

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Perković

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Marko Perković

Zagreb, 2013 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Danku Ćoriću na savjetima, vodstvu te ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva za ovaj rad.

Marko Perković

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA.....	1
1.1. Uvod.....	1
1.2. Statičko vlačno ispitivanje	3
1.3. Tvrdća	8
1.3.1. Brinellova metoda	8
1.3.2. Vickersova metoda.....	9
1.3.3. Rockwellova metoda.....	10
1.3.4. Shoreova metoda.....	11
2. ŽILAVOST.....	12
2.1. Čimbenici koji utječu na žilavost.....	14
2.2. Karakteristike žilavosti	24
2.2.1. Karakteristike žilavosti određene na zarezanim ispitnim uzorcima.....	24
2.2.1.1. Udarni rad loma – KU ili KV	24
2.2.1.2. Prijelazna temperatura žilavosti.....	24
2.2.1.3. Granična temperatura žilavosti	25
2.2.1.4. Temperatura duktilnosti	25
2.2.1.5. Lomna žilavost.....	25
2.2.2. Karakteristike žilavosti određene ispitivanjima na glatkim ispitnim uzorcima..	30
2.2.2.1. Tlačni (sabojni) udarni rad.....	30
2.2.2.2. Savojni udarni rad	30
2.2.2.3. Probojni udarni rad	30
2.2.2.4. Kut uvijanja.....	30
2.3. Metode ispitivanja žilavosti	31
2.3.1. Udarna rad loma po Izodu.....	31
2.3.2. Temperatura nulte duktilnosti prema Peliniju.....	32
2.3.3. Dinamička sila loma po Bruggeru	34
2.3.4. Udarni rad loma po Charpyu.....	35
2.3.4.1. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka.....	39
2.3.4.2. Ispitna temperatura.....	41
2.3.4.3. Prenosnje ispitnog uzorka	41

2.3.4.4.	Zaglavlj enje ispitnog uzroka.....	43
2.3.4.5.	Naknadni pregled	43
2.3.4.6.	Lateralno (bočno) širenje	43
2.3.4.7.	Izvješće o ispitivanju.....	45
3.	ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA PO CHARPYU	46
3.1.	Ispitivanje kemijskog sastava.....	46
3.2.	Ispitivanje mikrostrukture	48
3.3.	Ispitna oprema i postupak	53
3.4.	Analiza rezultata	59
3.4.1.	Prijelazna temperatura kao funkcija utrošene energije gornjeg nivoa krivulje...	60
3.4.2.	Prijelazna temperatura kao funkcija određenog udjela smičnog loma	61
LITERATURA.....		73
PRILOZI.....		74

POPIS SLIKA

Slika 1. Ispitni uzorak okruglog poprečnog presjeka	3
Slika 2. Kidalice za vlačno ispitivanje materijala	4
Slika 3. Dijagram kidanja mekog konstrukcijskog čelika	5
Slika 4. Dijagram naprezanje-istezanje za normalizirani konstrukcijski čelik	5
Slika 5. Dijagram naprezanje-istezanje za različite skupine tehničkih materijala	7
Slika 6. Prikaz mjerenja tvrdoće Brinellovom metodom	8
Slika 7. Prikaz mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom	10
Slika 8. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće Rockwellovom metodom	11
Slika 9. Prikaz krhkog (a) i žilavog loma (b)	12
Slika 10. Površina ispod σ - ϵ krivulje kao mjera žilavosti materijala	13
Slika 11. Prikaz prijeloma pri niskim i povišenim temperaturama: krhki lom (lijevo) i žilavi lom (desno)	16
Slika 12. Ovisnost žilavosti o temperaturi	17
Slika 13. Prikaz FCC (a) i BCC jedinične ćelije (b)	17
Slika 14. Vertikalni i horizontalni oslonci ispitnog uzorka	20
Slika 15. Prikaz geometrije njihala	22
Slika 16. Načini otvaranja napukline	25
Slika 17. Utjecaj amplitude faktora intenzivnosti naprezanja na brzinu rasta napukline	26
Slika 18. Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke metale	29
Slika 19. Shematski prikaz ispitivanja po Izodu	31
Slika 20. Ispitni uzorci za ispitivanje po Peliniju	33
Slika 21. Prikaz navara na ispitnim uzorcima	33
Slika 22. Suvremena izvedba Pellinija za male iznose energija	33
Slika 23. Suvremena izvedba Pellinija za srednje iznose energija	34
Slika 24. Suvremena izvedba Pellinija za velike iznose energija	34
Slika 25. Prikaz Bruggerovog uzorka	35
Slika 26. Višefunkcionalni ispitni uređaj za ispitivanje po Charpyu i Bruggeru	35
Slika 27. Shematski prikaz ispitivanja po Charpyu	36
Slika 28. Shematski prikaz kutova Charpyevog bata	37
Slika 29. Klasični Charpey bat s mjernom skalom	38
Slika 30. Suvremena izvedba Charpyevog bata za male iznose energija	38
Slika 31. Suvremena izvedba Charpyevog bata za velike iznose energija	38
Slika 32. Ispitni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma po Charpyu	39
Slika 33. Hvataljka za centriranje ispitnih uzoraka s V-zarezom	42
Slika 34. Dvije prelomljene polovice Charpyevog V-uzorka	44
Slika 35. Mjerni sat za mjerenje bočnog širenja	44
Slika 36. Optički emisijski spektrometar GDS 850A	47
Slika 37. Ispitni uzorak nakon kemijske analize	48
Slika 38. Uređaj za rezanje uzoraka	48

Slika 39. a) Kalupi za zalijevanje b) Uzorak nakon zalijevanja.....	49
Slika 40. Uređaj za brušenje uzorka s različitim brusnim papirima.....	50
Slika 41. Uređaj za poliranje uzorka	50
Slika 42. Nagrizanje uzorka	51
Slika 43. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu	52
Slika 44. Mikrostruktura uzorka pri povećanju:.....	53
Slika 45. Utiskivanje oznake na epruvetu i različiti utiskivači	54
Slika 46. Set označenih epruveta.....	54
Slika 47. Mjerenje dimenzija ispitnog uzorka.....	55
Slika 48. Charpyev bat za ispitivanje udarnog rada loma	56
Slika 49. Prikaz noža na udarnom batu	56
Slika 50. Pribor za prenošenje i centriranje epruvete (a); položaj epruvete na osloncima (b). 57	
Slika 51. Spremnik s CO ₂	58
Slika 52. Posuda za miješanje i termometar	58
Slika 53. Shematski prikaz krivulje apsorbirane energije i temperature.....	60
Slika 54. Dijagram ovisnosti udarnog rada loma o temperaturi.....	61
Slika 55. Određivanje udjela smičnog loma.....	62
Slika 56. Izgled prijelomnih površina	63
Slika 57. Analiza lomne površine pomoću programa „ImageJ“	63
Slika 58. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	64
Slika 59. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	64
Slika 60. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$	65
Slika 61. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$	65
Slika 62. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=-23\text{ }^{\circ}\text{C}$	66
Slika 63. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=-23\text{ }^{\circ}\text{C}$	66
Slika 64. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Slika 65. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Slika 66. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=-56\text{ }^{\circ}\text{C}$	68
Slika 67. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=-56\text{ }^{\circ}\text{C}$	68
Slika 68. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=-78\text{ }^{\circ}\text{C}$	69
Slika 69. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=-78\text{ }^{\circ}\text{C}$	69
Slika 70. Odnos krhkog/žilavog loma o temperaturi.....	70
Slika 71. Ovisnost udjela krhkog loma o temperaturi	71

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ispitivanje mehaničkih svojstva materijala	3
Tablica 2. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala	15
Tablica 3. Dimenzije i tolerancije uzorka sa V-zarezom	40
Tablica 4. Dimenzije i tolerancije uzorka sa U-zarezom	40
Tablica 5. Dimenzije hvataljke.....	42
Tablica 6. Kemijski sastav	47
Tablica 7. Dimenzije ispitnih uzoraka.....	55
Tablica 8. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	59
Tablica 9. Postotak smičnog loma.....	62
Tablica 10. Veličina površine krhkog loma	70

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	Duljina napukline
a_0	mm	Debljina početnog poprečnog presjeka
b_0	mm	Širina početnog poprečnog presjeka
$A_{1,2,3,4}$	mm	Vrijednost bočnog širenja epruvete
A_p	J	Potencijalna energija bata
A_N	J	Nazivna energija
d	mm	Promjer baze otiska
d_0	mm	Početni promjer epruvete
d_1, d_2	mm	Dijagonale kvadratnog otiska
d_u	mm	Konačni promjer nakon loma epruvete
D	mm	Promjer kuglice
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
E_1, E_2, E_3	J	Apsorbirana energija
f	-	Omjer granice razvlačenja i radnog naprezanja
F	N	Sila
F_e	N	Sila tečenja
F_m	N	Maksimalna sila
F_k	N	Sila loma
F_0	N	Sila predopterećenja
F_1	N	Dodatna sila
g	m/s ²	Ubrzanje zemljine sile teže
G	N	Težina bata
h	mm	Dubina otiska
h_0	mm	Početna dubina prodiranja
h_1	mm	Početna visina bata
h_2	mm	Krajnja visina bata
HBW	-	Tvrdoća po Brinellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
HRC	-	Tvrdoća po Rockwellu C
HRB	-	Tvrdoća po Rockwellu B
HS	-	Tvrdoća po Shoreu
K	MPa·m ^{1/2}	Faktor intenzivnosti naprezanja
K_0	MPa·m ^{1/2}	Granična vrijednost faktora intenzivnosti naprezanja
K_{maks}	MPa·m ^{1/2}	Maksimalni faktor intenzivnosti naprezanja
K_{min}	MPa·m ^{1/2}	Minimalni faktor intenzivnosti naprezanja

K	J	Apsorbirana energija
K_0	J	Početna potencijalna energija
K_{IC}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Lomna žilavost za način otvaranja pukotine I
K_{IIC}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Lomna žilavost za način otvaranja pukotine II
K_{IIIC}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Lomna žilavost za način otvaranja pukotine III
l	mm	Udaljenost okomita na ravninu osciliranja njihala
l_2	mm	Udaljenost od osi rotacije
L	mm	Udaljenost između težišta njihala i osi rotacije
L_0	mm	Početna mjerna duljina epruvete
L_u	mm	Konačna mjerna duljina nakon loma epruvete
ΔL	mm	Produljenje ispitnog uzorka
M	Nm	Moment njihala
N	-	Broj kristalnih zrna
n	-	Broj veličine kristalnog zrna
p	J	Gubici trenja u pokazivaču
p'	J	Gubici trenja u ležajevima i otpor zraka
r	J	Rezolucija pokazivača
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
R_k	MPa	Konačno naprezanje (lom epruvete)
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_a	μm	Površinska hrapavost
S_0	mm^2	Površina početnog presjeka
T_r	K	Radna temperatura
T_t	K	Talište materijala
v	m/s	Brzina bata
Z	%	Suženje poprečnog presjeka
X	-	Stupanj opterećenja
α	°	Kut pada
α	-	Faktor određen geometrijom dijela i oblikom napukline
β	°	Kut penjanja
$\vartheta_{50\%}$	°C	Granična temperatura žilavosti pri kojoj zagasiti dio prijelomne površine iznosi 50%
$\vartheta_{85\%}$	°C	Granična temperatura žilavosti pri kojoj zagasiti dio prijelomne površine iznosi 85%
ϑ_p	°C	Prijelazna temperatura
ε	mm/mm	Deformacija, istezanje
ε_{el}	mm/mm	Elastična deformacija
ε_{pl}	mm/mm	Trajna plastična deformacija
$\Delta \sigma$	MPa	Raspon naprezanja
σ	MPa	Naprezanje
τ_{th}	MPa	Smično naprezanje

SAŽETAK

U današnje vrijeme sam značaj mehaničkog ispitivanja materijala u svrhu unaprjeđenja postojeće tehnologije, proizvodnog ili obradnog sustava izvanredno je velik, pogotovo na mjestima upotrebe metalnih konstrukcija odnosno strojnih dijelova kod kojih radne temperature variraju ili su iznimno niske. Svrha ovog istraživanja jest proširenje dosadašnjih spoznaja o ponašanju materijala koje će doprinijeti većoj kvaliteti strojarskih proizvoda.

U radu je opisano značenje žilavosti materijala te je detaljno objašnjena metoda ispitivanja udarnog rada loma po Charpyu, ali i ostale metode kao što je ispitivanje po Pelliniju, Izodu i Bruggeru. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje udarnog rada loma na Charpyevom batu pri sniženim i niskim temperaturama s ciljem određivanja prijelazne temperature kao granice žilavog i krhkog ponašanja materijala. Određivanju prijelazne temperature pristupilo se s dva aspekta i oba kriterija dala su gotovo istovjetnu vrijednost ove temperature.

Ključne riječi: mehanička svojstva, udarni rad loma, Charpyev bat, prijelazna temperatura

SUMMARY

Nowadays, the importance of mechanical testing of materials in order to improve existing technologies, production or machining systems is extraordinarily high, especially in places that use metal structures or machine parts whose working temperatures vary or are extremely low. The purpose of this study is an extension of previous knowledge about the behavior of materials that will contribute to a better quality of mechanical products.

In this paper, the meaning and impact energy is explained in detail same with Charpy impact testing and other test methods such as testing by Pellini, Izod, Bruggen. Experimental part of the work is conducted on measuring impact energy on Charpy at reduced and low temperatures in order to determine the transition temperature as a boundary for ductile and brittle material behavior. Determining the transition temperature is approached from two aspects and both criteria yielded almost identical value of the temperature.

Key words: mechanical properties, fracture tendency, Charpy, transition temperature

1. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

1.1. Uvod

S novim tehnologijama koje vode razvoju novih i poboljšanju već postojećih materijala veliki naglasak stavlja se na mehanička svojstva materijala. Na primjer u proizvodnji zrakoplova, rabe se aluminijske legure ili ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti koji moraju biti lagani i čvrsti, ali i dovoljne dinamičke izdržljivosti da bi mogli podnijeti dugotrajna ciklička mehanička opterećenja. Čelici koji se koriste u gradnji objekata kao što su zgrade, mostovi moraju imati odgovarajuću mehaničku otpornost kako takve strukture ne bi ugrozile sigurnost korisnika. Polimeri koji se koriste u proizvodnji cijevi, ventila, podnica također moraju imati mehaničku otpornost i kemijsku stabilnost. Materijali poput grafita ili legura kobalta, kroma, volframa koji se koriste za izradu protetskih nadomjestaka ili srčanih zaliska nikako ne smiju zatajiti. Biokompatibilne legure titana koje se koriste kao koštani implantati moraju biti dovoljno žilavi i otporni na trošenje da opstanu u ljudskom organizmu dugi niz godina bez bilo kakvih oštećenja. Keramičko staklo koje se koristi kao baza za izgradnju magnetskih tvrdih diskova mora imati dovoljnu mehaničku čvrstoću kako se ne bi puklo pri rotaciji velikim brzinama. Mnogi dijelovi izrađeni od polimera, metala, keramike moraju zadržati mehaničku otpornost pri niskim odnosno visokim radnim temperaturama. Zato je kod izbora materijala potrebno poznavati zahtjeve koji se postavljaju na materijal iz čega slijede i određena mehanička svojstva koje on mora ispunjavati u konkretnom slučaju. Među različitim svojstvima kao što su tvrdoća, čvrstoća, žilavost, elastičnost potrebno je odabrati ona svojstva koja su primarna za određenu primjenu.

Velika primjena metala kao konstrukcijskog materijala pripisuje se prvenstveno vrlo povoljnim mehaničkim svojstvima koja se određuju putem određenih mehaničkih ispitivanja.

Ispitivanje materijala se vrši ne samo radi određivanja svojstva prilikom proizvodnje ili upotrebe već i u svrhu određivanja načina upotrebe i u cilju poboljšavanja svojstva kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primjene. Svakodnevni tehnološki razvoj prati uvođenje novih i usavršavanje postojećih metoda i postupaka ispitivanja.

Temeljni zadaci ispitivanja materijala su:

- određivanje prikladnih veličina tj. vrijednosti svojstava temeljem kojih se materijali mogu klasificirati,

- kontinuirana i široko automatizirana kontrola svojstva tijekom proizvodnje, prerade i obrade materijala s otkrivanjem mogućih grešaka,
- kontinuirana kontrola stanja materijala nakon određenog perioda eksploatacije,
- istraživanje uzroka raznih oštećenja i lomova strojnih dijelova i elemenata konstrukcija,
- razvoj novih materijala.

Zbog potrebe za usporedbom izmjerenih svojstava i performansi materijala korisnici i proizvođači materijala razvili su normirane metode ispitivanja, kao što su primjerice one Američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM - *American Society for Testing and Materials*) i međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO - *International Organization for Standardization*).

Svojstva materijala općenito pa tako i mehanička svojstva isključivo su posljedica strukture materijala. Struktura nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupcima. Tako se izborom određenog materijala i odgovarajućeg tehnološkog procesa postiže ciljana mikrostruktura koja će dati željena svojstva pa tako i ona mehanička.

Poznavanjem korelacije struktura – mehanička svojstva materijala moguće je unaprijed proračunati mehanička svojstva. To nažalost vrijedi samo za idealnu tvar jer u realnom materijalu prisutne su različite nepravilnosti u strukturi koje onemogućavaju takav proračun. Tako na primjer teoretsko smično naprezanje potrebno za smicanje idealnog kristala α -Fe iznosi $\tau_{th} = 8400 \text{ N/mm}^2$ dok stvarno naprezanje za α -Fe iznosi samo $\tau_{th} = 10 \text{ N/mm}^2$.

Razlog tako velikom smanjenju u odnosu na teoretsku veličinu predstavljaju različite nepravilnosti odnosno defekti kristalne strukture. Među njima se osobito ističu dislokacije. Zbog različitih nepravilnosti prisutnih kod realnih materijala, koje je nemoguće obuhvatiti proračunom, mehanička svojstva mogu se utvrditi samo eksperimentalnim putem. Zbog toga je na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena različita laboratorijska oprema. Naime pri takvim ispitivanjima često se nastoje simulirati uvjeti kakvima će određeni materijal biti izložen tijekom eksploatacije. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

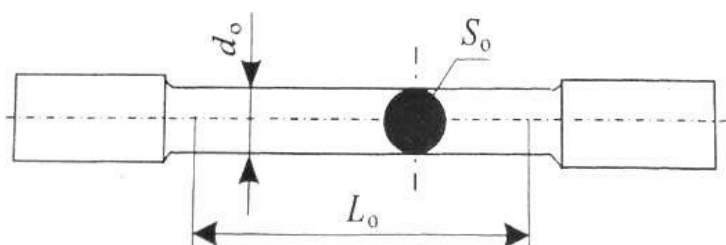
provodi se na posebno pripremljenim uzorcima koji se nazivaju "epruvete" ili "ispitni uzorci" ali isto tako i na gotovim strojnim elementima ili čak cijelim sklopovima. U skladu s vrstom opterećenja tijekom eksploatacije epruvete se opterećuju na vlak, tlak, savijanje, uvijanje i smik. Opterećenje može biti statičko - konstantno tijekom vremena ili s malim prirastom opterećenja u jedinici vremena, odnosno dinamičko ukoliko se njegov intenzitet mijenja tijekom vremena. Različite vrste mehaničkih ispitivanja prikazane su tablici 1.

Tablica 1. Ispitivanje mehaničkih svojstva materijala

Način djelovanja opterećenja	Trajanje djelovanja opterećenja	
	Kratkotrajno	Dugotrajno
Statičko	Vlačno ispitivanje Tlačno ispitivanje Savojno ispitivanje Uvojno ispitivanje Smično ispitivanje	Ispitivanje puzanja
Dinamičko/udarno	Ispitivanje udarnog rada loma	Ispitivanje umora

1.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje je postupak ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na kidalici, kojim se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala. Iz materijala koji se ispituje izrezuje se ispitni uzorak propisanog oblika i dimenzija koji se još naziva i epruveta. Najčešće je to (ovisno o obliku poluproizvoda) ispitni uzorak cilindričnog oblika, kod kojeg su promjer i mjerna duljina u određenom razmjeru. Na kidalici se mjeri sila F i pripadajuće produljenje ispitnog uzorka ΔL . Na slici 1 prikazana je epruveta okruglog poprečnog presjeka.



Slika 1. Ispitni uzorak okruglog poprečnog presjeka

Veličine prikazane na slici su slijedeće:

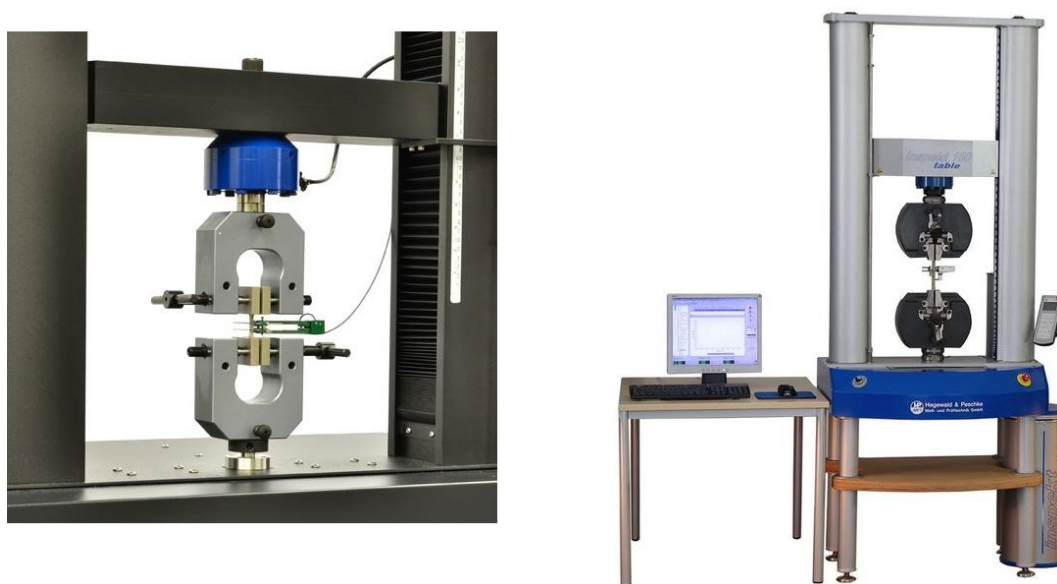
- d_0 - početni promjer epruvete, mm
- L_0 - početna mjerna duljina epruvete, mm
- S_0 - početna površina poprečnog presjeka epruvete, mm².

Obzirom na početnu mjernu duljinu L_0 epruvete se dijele na:

- duge epruvete $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$, $S_0 = a_0 \cdot b_0$ ili za okrugle epruvete: $L_0 = 10 \cdot d_0$,
- kratke epruvete $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ ili za okrugle epruvete: $L_0 = 5 \cdot d_0$.

gdje su a_0 i b_0 debljina i širina početnog poprečnog presjeka plosnate epruvete.

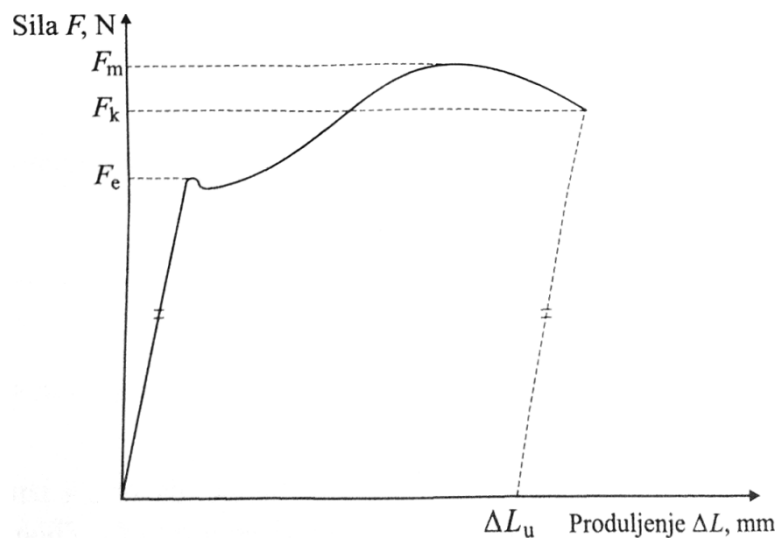
Epruveta se na mjestima zadebljanja ("glava") učvrsti u čeljusti kidalice i opterećuje vlačnom silom sve do loma (slika 2) pri čemu se snima dijagram sila-produljenje prikazan slikom 3.



Slika 2. Kidalice za vlačno ispitivanje materijala

U prvom dijelu dijagrama kidanja (dijagram $F-\Delta L$) linearna je ovisnost između sile i produljenja, što znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Takva zakonitost vrijedi sve do sile F_e koja se naziva silom tečenja (razvlačenja). Nakon dostizanja te sile ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak i mali pad opterećenja. Za daljnji porast produljenja potreban je opet porast sile. Međutim u tom dijelu statičkog vlačnog ispitivanja više ne postoji linearna ovisnost između sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do

maksimalne sile F_m , nakon koje se epruveta produljuje uz sve manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile F_k dolazi do loma (pucaanja) epruvete.



Slika 3. Dijagram kidanja mekog konstrukcijskog čelika

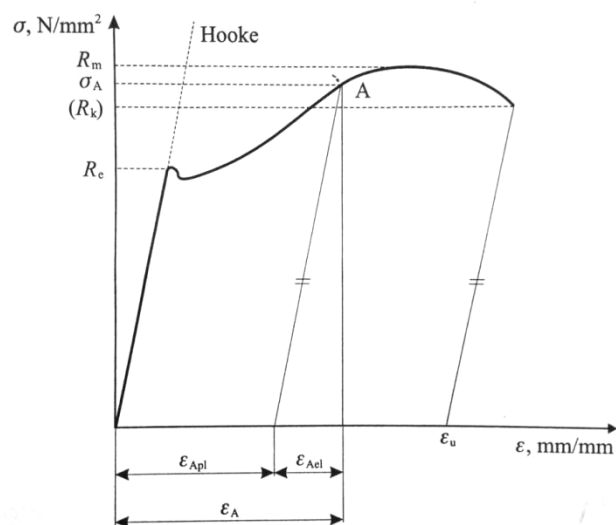
Ako se umjesto sile (F) uvede naprezanje (σ):

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, N/mm^2$$

a umjesto produljenja (ΔL) istežanje ili relativno produljenje (ϵ):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, mm/mm$$

dobiva se dijagram naprezanje-istežanje (σ - ϵ) prikazan na slici 4.



Slika 4. Dijagram naprezanje-istežanje za normalizirani konstrukcijski čelik

Dijagram σ - ε počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeov pravcem koji predstavlja područje naprezanje materijala bez pojave plastične ili trajne deformacije. Nakon što naprezanje dosegne vrijednost R_e materijal počinje „teći“. Vrijednost R_e naziva se granica razvlačenja ili granica tečenja materijala i računa prema izrazu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, N/mm^2$$

gdje je:

- F_e - sila tečenja [N]
- S_0 - površina početnog poprečnog presjeka [mm²].

Nakon što materijal prijeđe granicu razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Ako se u točki A (vidi sliku 4) epruveta rastereti u njoj će ostati prisutna plastična ili trajna deformacija ε_{Apl} . To znači da će razmak mjernih točaka biti uvećan za iznos ΔL_A pa je:

$$\varepsilon_{Apl} = \frac{\Delta L_A}{L_0}, mm/mm$$

U dijagramu σ - ε iznos trajne deformacije dobije se tako da se iz željene točke na dijagramu povuče paralela s Hookeovim pravcem i nađe presjecište s osi apscisa.

Vrijednost R_m je naprezanje kod maksimalne sile i naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i računa prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, N/mm^2$$

gdje je:

- F_m – maksimalna sila [N]
- S_0 - površina početnog poprečnog presjeka [mm²].

Nakon dostignute vrijednosti R_m , deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj mjernoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje vrat epruvete i ona puca pri vrijednosti konačnog naprezanja:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, N/mm^2$$

gdje je:

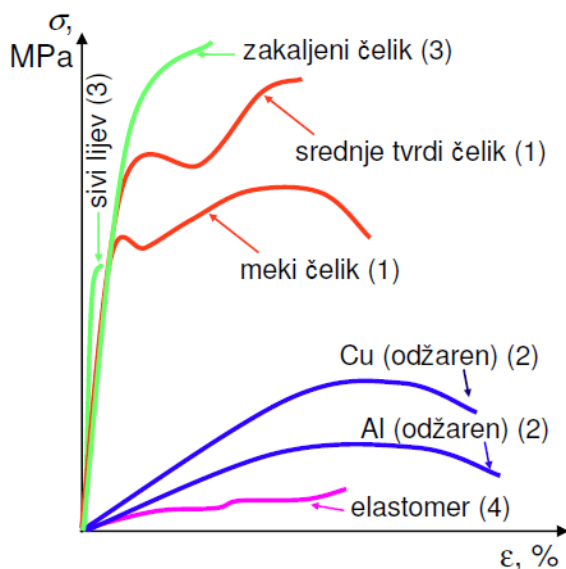
- F_k – konačna sila [N]
- S_0 – površina početnog poprečnog presjeka [mm^2].

Vrijednost konačnog istezanja koja karakterizira deformabilnost epruvete (materijala) u uzdužnom smjeru određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm}$$

σ - ε dijagrami različitih materijala mogu se podijeliti u četiri osnovna oblika, slika 5:

- (1) s izraženom granicom razvlačenja (npr. meki i srednje tvrdi čelici),
- (2) s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u područje elastično/plastičnih deformacija (npr. bakar i aluminij),
- (3) bez područja plastičnih deformacija (krhki materijali poput sivog lijeva ili zakaljenog čelika),
- (4) s entropijskom elastičnom deformacijom, npr. neki organski materijali i polimeri tipa elastomera.



Slika 5. Dijagram naprezanje-istezanje za različite skupine tehničkih materijala

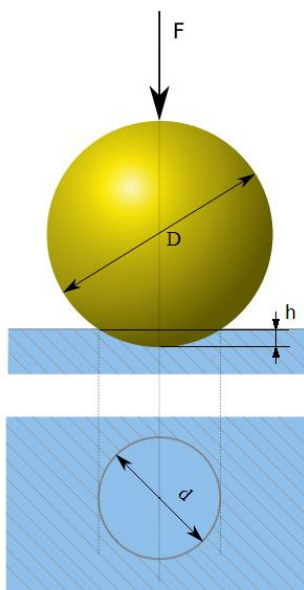
1.3. Tvrdća

Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdjeg tijela. Tvrdoća se može izraziti i kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji. Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome je s jedne strane što je tvrdoća u vezi s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. vlačnom čvrstoćom), a s druge strane mjerenje tvrdoće je jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava. Nadalje, za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Zbog toga su se s vremenom razvile različite metode mjerenja tvrdoće:

- metoda po Vickersu,
- metoda po Rockwellu,
- metoda po Brinellu,
- metoda po Shoreu.

1.3.1. Brinellova metoda

Tvrdoća po Brinellu (oznaka: HBW) je otpor materijala prema prodiranju kuglice od tvrdog metala promjera D (mm), opterećene silom F (N). U ispitivanom materijalu nastaje otisak oblika kugline kalote promjera baze d i dubine h , slika 6.



Slika 6. Prikaz mjerenja tvrdoće Brinellovom metodom

Kada se pomoću mjernog povećala izmjere dva okomita promjera baze kugline kalote i izračuna njihova srednja vrijednost (d) tvrdoća se određuje iz izraza:

$$HB = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

gdje su:

- F - sila [N],
- D - promjer kuglice [mm],
- d – srednji promjer baze kugline kalote (otiska) [mm].

Prednosti Brinellove metode jesu sljedeće:

- lako mjerenje veličine otiska - dovoljno je mjerno povećalo,
- metoda je selektivna – široko mjerno područje,
- jednostavna priprema površine - dovoljno je i grubo brušenje,

dok su nedostaci:

- nemogućnost mjerenja visokih tvrdoća,
- tvrdoća je ovisna o opterećenju, pa se prema "stupnju opterećenja (X)" izabire odgovarajuća sila,
- otisak je relativno velik, te funkcionalno i estetski nagrđuje površinu (ukoliko se tvrdoća mjeri na proizvodu a ne na uzorku).

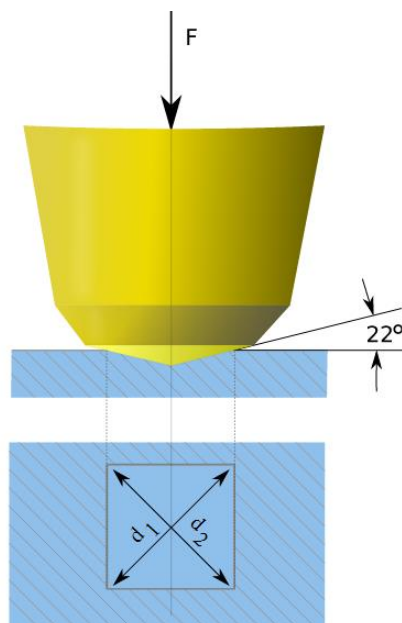
1.3.2. Vickersova metoda

Tvrdoća po Vickersu (oznaka: HV) je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranju dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od 136° , opterećene silom F (N), slika 7. Utiskivač ovakve geometrije ostavlja u materijalu otisak oblika šuplje piramide kvadratne baze. Za određivanje tvrdoće potrebno je pomoću mjernog mikroskopa izmjeriti dvije međusobno okomite dijagonale kvadrata (d_1 i d_2) i izračunati njihovu srednju vrijednost d , a tvrdoća slijedi iz izraza:

$$HV = \frac{F \cdot 0,1891}{d^2}$$

gdje je:

- F - primijenjena sila [N],
- d -srednja vrijednost dijagonale, $d=(d_1+d_2)/2$, [mm].



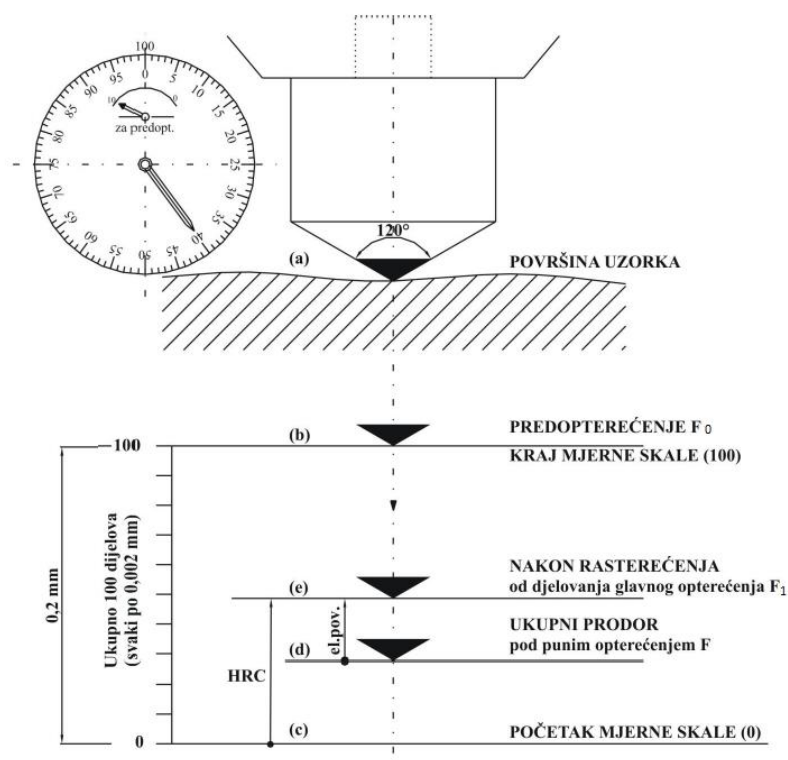
Slika 7. Prikaz mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom

Vickersovom metodom uklonjeni su glavni nedostaci Brinellove metode, pa je po ovoj metodi moguće mjeriti tvrdoću i najtvrdih materijala, a vrijednosti izmjerene tvrdoće nisu ovisne o sili F . Primjenom malim silama utiskivanja moguće je mjeriti tvrdoću vrlo tankih uzoraka odnosno tvrdoću zrna (kristala) u mikrostrukturi materijala. Nedostaci ove metode su potreba za mjernim mikroskopom i složenija priprema ispitne površine koja zahtijeva brušenje i poliranje.

1.3.3. Rockwellova metoda

Tvrdoća po Rockwellu određuje se temeljem dubine prodiranja utiskivača. Utiskivač je dijamantni stožac s vršnim kutom od 120° (HRC metoda) ili zakaljena čelična kuglica promjera 1,5875 mm ili 3,175 mm (HRB metoda).

Utiskivač se prisloni na površinu uzorka i predoptereći silom F_0 (obično $10 \text{ kp} \approx 100 \text{ N}$), pri čemu nastaje otisak dubine h_0 . To je ishodišni položaj pri kojem se mjerni sat namješta na nulu. Zatim se opterećenje povećava za iznos sile F_1 tako da je ukupno opterećenje $F = F_0 + F_1$ pri čemu utiskivač prodire dublje u materijal, slika 8. Nakon uklanjanja glavnog opterećenja F_1 stožac se zbog elastičnosti materijala podiže i dubina prodiranja na ovom položaju daje vrijednost tvrdoće materijala.



Slika 8. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće Rockwellovom metodom

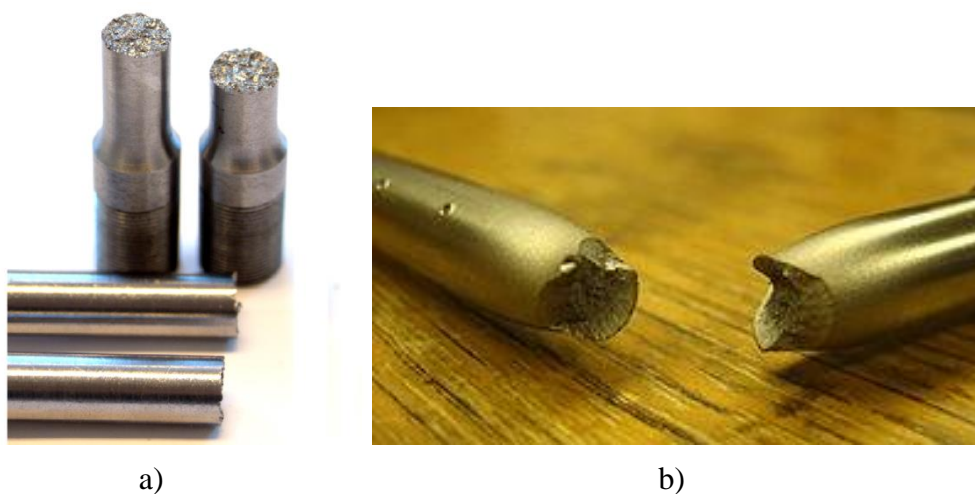
Postupak mjerenja po Rockwellu je puno brži nego kod Brinella i Vickersa, no slabija je selektivnost metode. Mjerno područje kod HRC metode podijeljeno je na 100 jedinica, a u praksi se koristi još uži dio od 20 do samo 70 HRC.

1.3.4. Shoreova metoda

Tvrdoća po Shoreu zasniva se na mjerenju elastičnog odskoka valjčića (durometar) određene mase koji se pusti s određene visine slobodno padati na površinu ispitivanog materijala. Visina odskoka je proporcionalna tvrdoći materijala. Ovaj je postupak pogodan za mjerenje tvrdoće polimera. Pri mjerenju tvrdoće po Shoreu postoji nekoliko varijanti mjerenja u dinamičkim i statičkim uvjetima. Najčešće se koriste metode Shore A i D. Shore A se upotrebljava za mjerenje tvrdoće mekih polimera, dok se Shore D koristi kod tvrdih polimera.

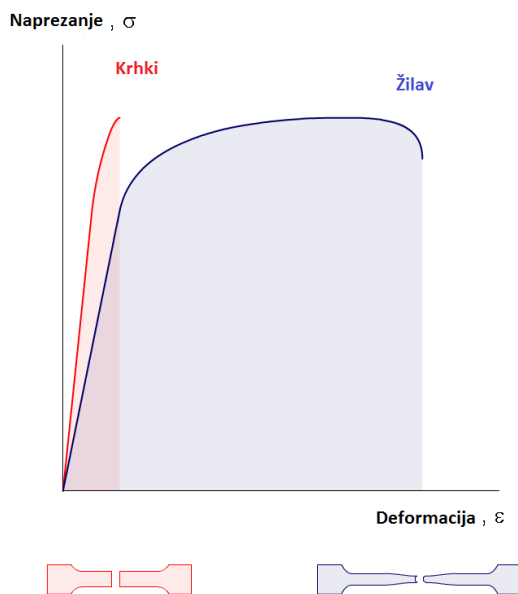
2. ŽILAVOST

Za većinu mehanički opterećenih konstrukcija vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Naime, praksa pokazuje da velik broj lomova nastaje zbog nemogućnosti razgradnje naprezanja putem plastične deformacije materijala. Dakle, pojam žilavosti je usko povezan s pojmom trajne (plastične) deformacije i pojavom loma. Prema prisutnosti odnosno odsutnosti plastične deformacije u neposrednoj blizini loma razlikuju se krhki i žilavi lom (slika 9), odnosno materijali se dijele na krhke i žilave.



Slika 9. Prikaz krkhog (a) i žilavog loma (b)

Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije, uzrokovane vanjskim, uglavnom udarnim opterećenjem, putem plastične deformacije materijala. Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom predstavlja mjeru žilavosti materijala. Površina ispod σ - ε krivulje pokazuje koliko je energije potrebno za deformaciju i lom materijala u uvjetima statičkog vlačnog opterećenja, slika 10.



Slika 10. Površina ispod σ - ε krivulje kao mjera žilavosti materijala

Kod žilavog loma prisutna je snažna plastična deformacija u svim koracima širenja pukotine sve do loma. Nastaje pri malim brzinama širenja pukotine i pri naprezanju većem od granice razvlačenja materijala.

Kod krhkog loma, djelovanje naprezanja ne rezultira plastičnom deformacijom već samo elastičnom i početna mikropukotina brzo se širi duž određene kristalne ravnine. Osim sklonosti nekih materijala krhkom lomu (npr. kaljeni čelik, sivi lijev), on se javlja kod sniženih i niskih temperatura i velikih brzina prirasta naprezanja.

Na pojavu krhkog loma utječu sljedeći faktori:

- konstrukcijsko oblikovanje: urezi, provrti, nagle promjene presjeka, debelostijene konstrukcije i dr.,
- proizvodni postupci koji uzrokuju površinske i unutrašnje pogreške i uvode zaostala naprezanja (urezi, ogrebotine, tragovi brušenja, plinski mjehurići, lunke i dr.),
- uvjeti naprezanja: udarno opterećenje, višeosno stanje naprezanja (npr. kao posljedica zavarivanja ili postupka deformiranja),
- okolišni uvjeti: snižena temperatura, korozijska oštećenja površine, napetosna korozija, djelovanje vodika, djelovanje tekućih metala i dr.,

- sastav i mikrostruktura materijala: krhkom lomu su skloniji metali s BCC i HCP rešetkom, ljevačkom grubozrnatom mikrostrukturom, nesmireni čelici, materijali koji sadrže nečistoće i nemetalne uključke, dozrijevani materijali i dr.

Definiranje potrebne razine žilavosti nije lak zadatak pri razvoju konstrukcije i izboru materijala, jer to svojstvo nema jednoznačno fizikalno objašnjenje i brojčano usporedbeno iskazivanje kao npr. čvrstoća, modul elastičnosti i slična svojstva. Čvrste veze i korelacije između žilavosti i ostalih mehaničkih svojstava ne postoje, ali u većini slučajeva materijali više čvrstoće i tvrdoće imaju nižu žilavost i obrnuto. U pravilu žilavost je niža pri nižim temperaturama, većim brzinama deformacije i pri višim vrijednostima elastičnih konstanti materijala.

Većina mjernih karakteristika žilavosti ne može se rabiti za proračune nosivosti i sigurnosti već su samo usporedbene veličine. Mehanika loma koja se bavi nastankom i širenjem pukotine posljednjih je desetljeća znatno pridonijela kvantitativnom opisivanju procesa širenja pukotine te računskoj provjeri sigurnosti konstrukcija koje sadrže pogreške u obliku ureza, šupljina ili pukotina.

2.1. Čimbenici koji utječu na žilavost

Na žilavost čelika i drugih materijala utječe prije svega radna temperatura (radni uvjeti) i vrsta materijala (kemijski sastav, udjel nečistoća u čeliku, mikrostruktura, toplinska obrada i drugo). Prilikom mjerenja žilavosti na ispitnim uzorcima postoje i druge utjecajne veličine kao što su:

- oblik i dimenzija epruvete,
- orijentacija ispitnog uzorka,
- centriranje epruvete na osloncima,
- ispitni uređaj i njegove karakteristike,
- broj ispitnih epruveta.

Utjecaj temperature

Radna temperatura ima najveći utjecaj na žilavost materijala. Pojedini dijelovi strojeva izloženi su tijekom uporabe vrlo visokim temperaturama dok opet neki drugi mogu raditi na

niskim temperaturama. Radna temperatura može biti viša od 1000 °C i niža od -50 °C pa konstrukcijski materijali moraju zadržati dovoljnu mehaničku otpornost i pri takvim temperaturama.

Promjenom temperature općenito se mijenja granica razvlačenja, čvrstoća, modul elastičnosti, dinamička izdržljivost, otpornost puzanju te duktilnost (istežljivost) kao i žilavost materijala.

Kod nekih materijala te su promjene izraženije nego kod drugih tako da se svakoj skupini može pridružiti karakteristično područje temperatura kod kojih nastupaju izraženije promjene svojstava. Visina granične temperature iznad koje dolazi do bitnije promjene svojstava ovisi o talištu materijala (T_t). Radne temperature (T_r) se uobičajeno dijele na:

- niske temperature: $T_r < 0,25 \cdot T_t$,
- povišene temperature: $T_r = (0,25 \div 0,4) \cdot T_t$,
- visoke temperature: $T_r > 0,4 \cdot T_t$, (T po Kelvinovoj skali).

U tablici 2 navedene su niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature za neke važnije metale. Zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od približno $2/3 \cdot T_t$ premda su u praksi maksimalne radne temperature često znatno niže.

Tablica 2. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala

Vrsta metala	Talište (T_t), °C	Niske temp., °C	Povišene temp., °C	Visoke temp., °C	Potencijalna radna temp. ($2/3 \cdot T_t$), °C
Al	660	< -40	od -40 do +100	> 100	350
Cu	1083	< 66	66-270	> 270	630
Ni	1453	< 160	160-420	> 420	880
Fe	1536	< 180	180-450	> 450	930
Ti	1670	< 212	212-504	> 504	1020
Zr	1852	< 258	258-577	> 577	1150
Cr	1900	< 270	270-596	> 596	1180
Hf	2222	< 351	351-725	> 725	1390
Nb	2468	< 412	412-823	> 823	1550
Mo	2610	< 448	448-880	> 880	1650
Ta	2996	< 544	544-1035	> 1035	1910
W	3410	< 648	648-1200	> 1200	2180

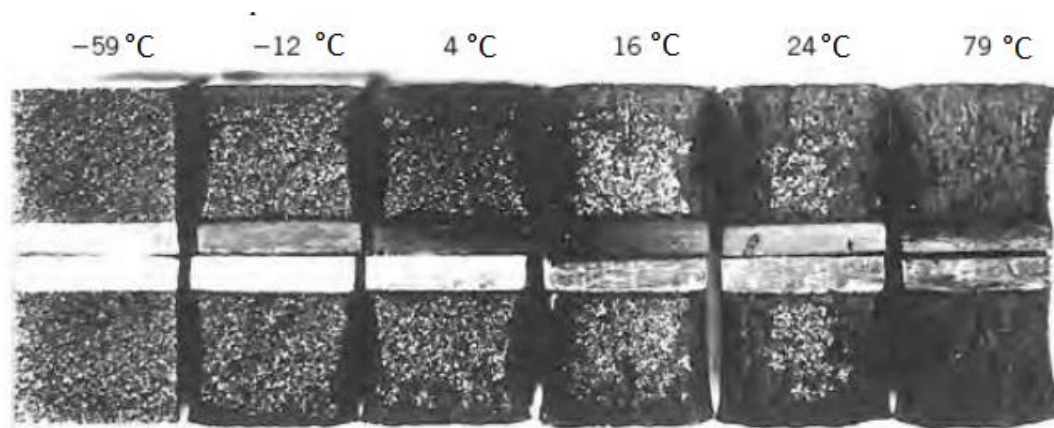
Dijelovi koji rade pri niskim, povišenim i visokim radnim temperaturama dimenzioniraju se na temelju mehaničkih svojstava utvrđenih statičkim vlačnim kratkotrajnim ispitivanjem,

ali pri definiranoj temperaturi koja obično odgovara radnoj. Za proračun se uzimaju sljedeća svojstva:

- $R_{m/g}$ - vlačna čvrstoća pri nekoj temperaturi,
- $R_{p0,2/g}$ - konvencionalna granica razvlačenja pri nekoj temperaturi,
- E_g - modul elastičnosti pri nekoj temperaturi.

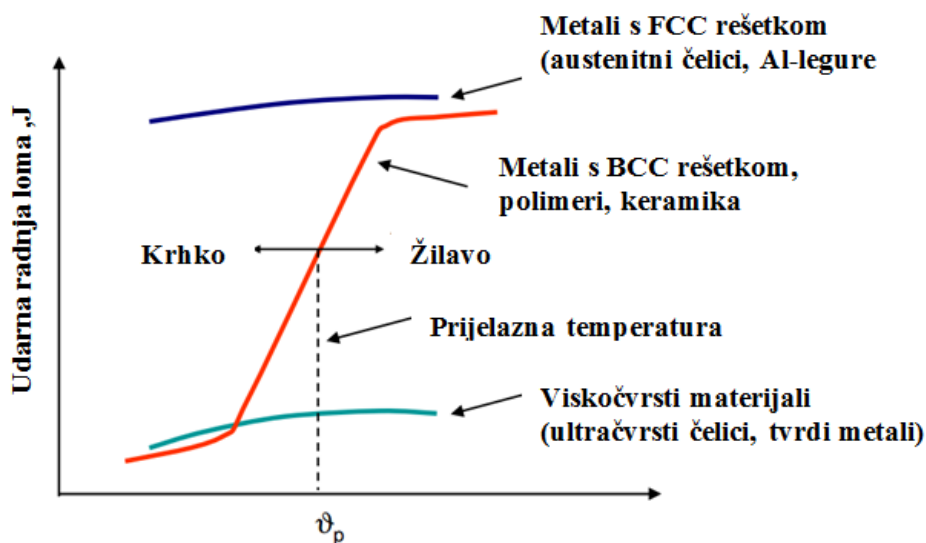
Sa snižavanjem temperature žilavost, ovisno o materijalu, smanjuje se u većoj ili manjoj mjeri. Neki metalni materijali snižavanjem temperature pokazuju osobinu naglog pada žilavosti. S druge strane, nehrđajući čelici, legure nikla i aluminijske legure ne pokazuju takav efekt.

Na višim temperaturama odgovarajuće čelike karakterizira tzv. plastični ili žilavi lom sa karakterističnim izgledom vlaknaste strukture i jako deformiranim presjekom na mjestu loma. Pri nižim temperaturama nastupa krhki lom s izraženom zrnatom strukturom i vrlo malim deformacijama na mjestu loma, kao što prikazuje slika 11.



Slika 11. Prikaz prijeloma pri niskim i povišenim temperaturama: krhki lom (lijevo) i žilavi lom (desno)

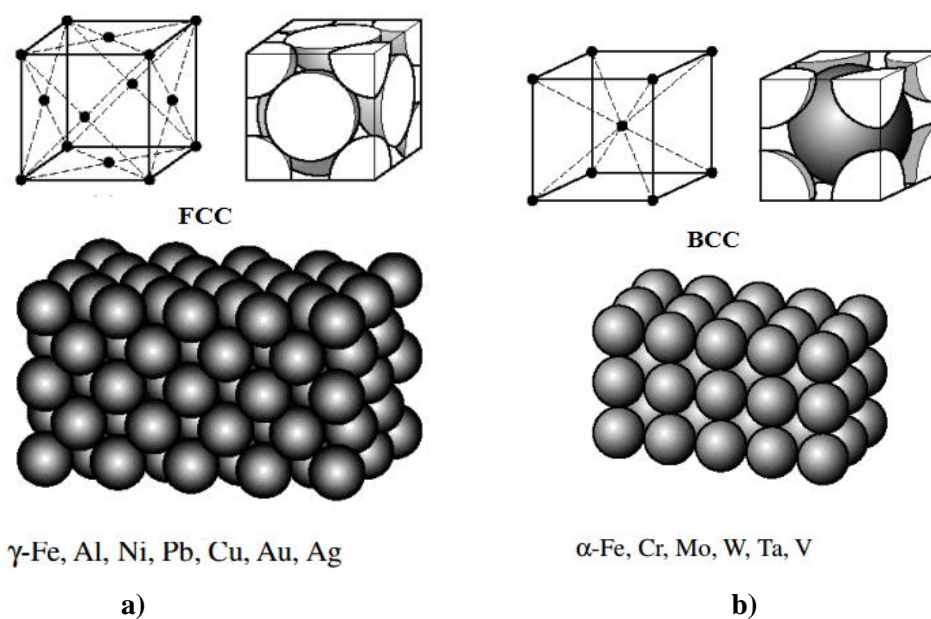
Cilj ispitivanja žilavosti na sniženim temperaturama je formiranje ovisnosti pokazatelja žilavosti o temperaturi i definiranje temperature naglog pada žilavosti (prijelazna točka krivulje – prijelazna temperatura) ili provjere žilavosti po kriteriju koji je predviđen za odgovarajući element ili konstrukciju. Slika 12 prikazuje dijagram ovisnosti udarne žilavosti o temperaturi kao i točku prijelazne temperature (\mathcal{G}_p).



Slika 12. Ovisnost žilavosti o temperaturi

Utjecaj kemijskog sastava

Legure koje imaju plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku FCC (slika 13a) imaju uglavnom visoku žilavost (npr. austenitni čelici, legure bakra, aluminijske legure). Materijali s velikom čvrstoćom obično imaju nisku žilavost. Kod legura s prostorno centriranom kubičnom kristalnom strukturom BCC (slika 13b) žilavost značajno ovisi o temperaturi (sa snižavanjem temperature dolazi do značajnog pada žilavosti).



Slika 13. Prikaz FCC (a) i BCC jedinične ćelije (b)

Utjecaj mikrostrukture

Mikrostruktura ima isto veliki utjecaj na žilavost materijala. Što je kristalno zrno manje, to je žilavost veća. Kod čelika smanjenje veličine kristalnog zrna za mjernu jedinicu 1 po ASTM E112 skali, snižava prijelaznu temperaturu ispitivanja za oko 15 °C.

Određivanje veličine kristalnih zrna izvodi se ASTM (engl. *American Society for Testing and Materials*) E 112 metodom:

$$N = 2n - 1$$

gdje je:

- N – broj kristalnih zrna na površini od 1 in² (četvorni palac), pri povećanju od 100 puta,
- n – broj veličine kristalnog zrna po ASTM-u. Veličine kristalnih zrna se kreću od 00 do 14.

Ispitna oprema

Oprema koja se koristi prilikom mjerenja mora biti sljediva do nacionalnog ili međunarodnog etalona i mora se redovito umjeravati. Ako se ispitivanje provodi na Charpyevom batu on mora biti postavljen i ispitan sukladno normi HRN EN ISO 148-2.

Elementi Charpyevog bata koji mogu utjecati na žilavost jesu slijedeći:

- temelji uređaja,
- njihalo,
- geometrija noža bata,
- položaj postolja prema njihalu,
- horizontalni i vertikalni oslonci,
- pokazivač energije,
- potencijalna energija bata,
- gubici trenja i otpora zraka,
- brzina udara,
- nazivna energija bata.

Temelji uređaja

Temelj ispitnog uređaja moraju biti dovoljno masivni kako se tijekom ispitivanja ne bi javile vibracije koje mogu štetno utjecati na vrijednost udarne žilavosti. Stoga masa temelja mora biti barem 40 puta veća od mase njihala.

Njihalo i bat

Širina bata treba iznositi između 10 i 18 mm. Kut između kontaktne linije noža i horizontalne osi ispitnog uzorka treba iznositi $90^\circ \pm 2^\circ$.

Mehanizam za otpuštanje njihala iz njegovog početnog položaja treba djelovati slobodno tako da nema trzaja, kašnjenja ili poprečnih vibracija. Ako ovaj mehanizam uključuje i sustav kojim se ostvaruje lom treba osigurati njegovu zaštitu od akcidentnog djelovanja loma.

Neki materijali pokazuju signifikantnu ovisnost udarnog rada loma o geometriji noža Charpyevog bata. Nož može biti polumjera 2 mm ili 8 mm. Kod onih materijala koji pokazuju značajnu promjenu u rezultatima pri niskim energijama rezultati s nožem polumjera 2 mm mogu biti viši od rezultata s nožem 8 mm. Zbog toga se polumjer noža preporuča iskazati u obliku KV₂ ili KV₈. Kut vrha noža treba biti $30^\circ \pm 1^\circ$.

Položaj postolja prema njihalu

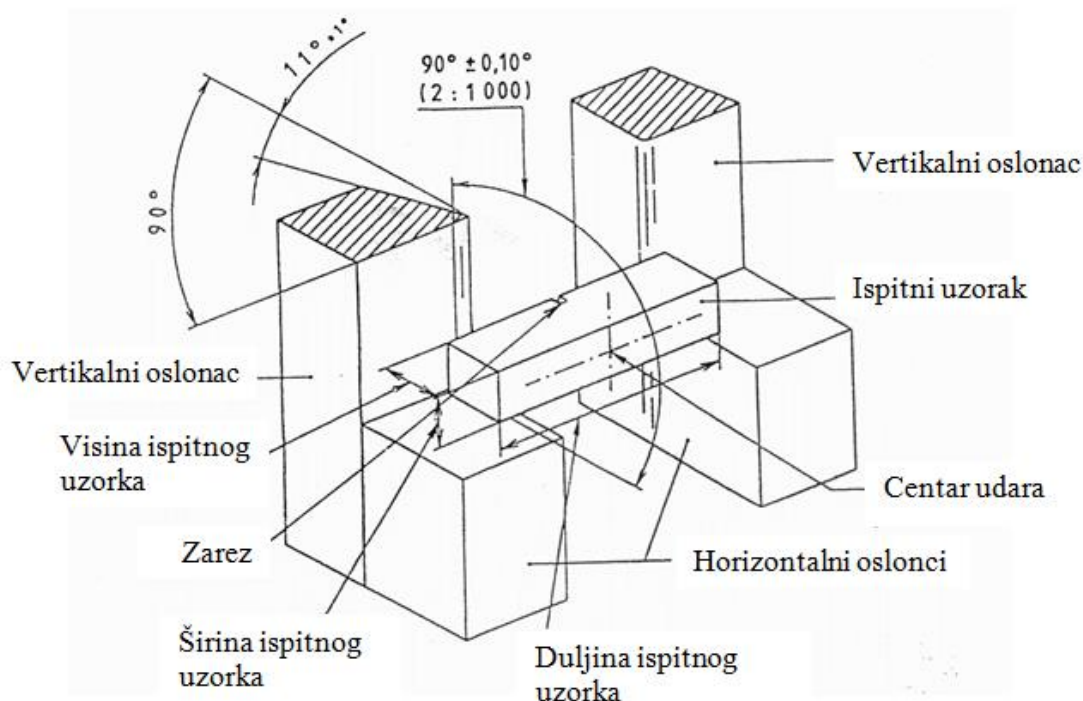
Kada je slobodno, njihalo treba visjeti tako da je rub noža udaljen $\pm 0,5$ mm od točke na kojoj rub noža dodiruje ispitni uzorak. Njihalo treba oscilirati u ravnini okomitoj na os rotacije unutar 3/1000. Rub noža treba biti u kontaktu s ispitnim uzorkom duž cijele širine uzorka. Njihalo treba biti tako pozicionirano da se centar ruba noža podudara sa središnjom ravinom koja prolazi između vertikalnih oslonaca ispitnog uzorka, uz dozvoljeno odstupanje od $\pm 0,5$ mm.

Transverzalno gibanje ležaja njihala, mjereno kod noža, ne smije biti veće od 0,25 mm kada na centar noža djeluje transverzalna sila od približno 4 % mase njihala.

Radijalno gibanje ležaja njihala ne smije biti veće od 0,08 mm kada se primjeni sila od $150 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ na udaljenosti l okomito na ravninu osciliranja njihala.

Horizontalni i vertikalni oslonci

Oslonci na koje oslanja ispitni uzorak moraju biti određene geometrije kako se njihov položaj i dimenzije ne bi odrazile na rezultat mjerenja. Na slici 14 prikazani su horizontalni i vertikalni oslonci te položaj epruvete tijekom ispitivanja.



Slika 14. Vertikalni i horizontalni oslonci ispitnog uzorka

Horizontalni oslonci trebaju ležati u istoj ravnini. Razlika između ravnina horizontalnih oslonaca ne smije biti veća od 0,1 mm. Horizontalni oslonci trebaju biti takvi da je os ispitnog uzorka paralelna s osi rotacije njihala unutar 3/1000.

Vertikalni oslonci također trebaju ležati u jednoj ravnini, a razlika između ovih ravnina ne smije prijeći 0,1 mm.

Kut između ravnina vertikalnih i horizontalnih oslonaca treba biti $90^\circ \pm 0,10^\circ$. Udaljenost između vertikalnih oslonaca treba biti $40^{+0,20}_0$ mm. Polumjer zaobljenosti vertikalnih oslonaca treba biti $1^{+0,5}_0$ mm. Kut suženja vertikalnih oslonaca treba biti $11^\circ \pm 1^\circ$.

Potrebno je osigurati dovoljnu zračnost između vertikalnih oslonaca i njihala kako bi prelomljeni komadi ispitnog uzorka slobodno pali bez interakcije s uređajem te bez odbijanja

od bata prije nego što njihalo načini punu oscilaciju. Nijedan dio njihala koji prolazi između vertikalnih oslonaca ne smije biti deblji od 18 mm.

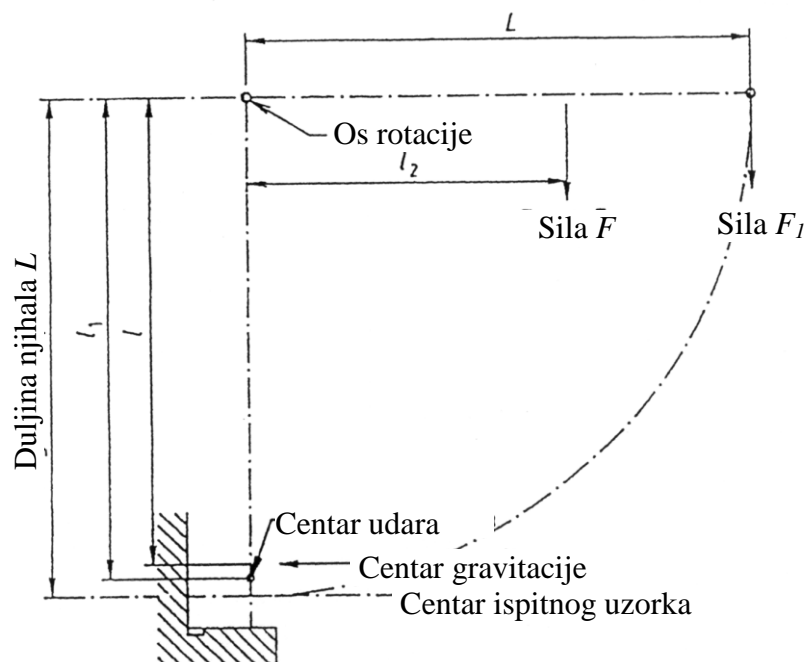
Pokazivač energije

Na skali uređaja može biti označen kut penjanja bata ili energija koja se utroši na lom. Mjerna skala i njena rezolucija također mogu utjecati na točnost očitavanja žilavosti. Stoga debljina oznaka podjele na analognoj skali treba biti ujednačena, a širina kazaljke mora približno odgovarati širini oznake podjele. Kazaljka treba omogućiti očitavanje bez paralakse. Rezolucija pokazivača r dobiva se iz omjera širine kazaljke i najmanje udaljenosti između središta dviju susjednih oznaka podjele skale. Preporučeni su omjeri: 1:4, 1:5 ili 1:10. Za očitavanje 1/10 podjele skale potreban je razmak najmanje 2,5 mm između dvije susjedne oznake. Podjela skale treba odgovarati najviše 1/100 početne potencijalne energije i treba omogućiti određivanje prirasta energije od barem 0,25 % početne potencijalne energije.

Kod digitalne skale rezolucija je jednaka najmanjoj promjeni na brojaču digitalnog pokazivača, pod uvjetom da pokazivanje ne varira više od jednog pomaka.

Potencijalna energija bata

Potencijalna energija bata (A_p) ne smije odstupati od nazivne energije (A_N) za više od ± 1 %. Ova se energija provjerava tako da se određuje sila koju bat ima u horizontalnoj ravnini. Po prirodi konstrukcije, težište njihala uvijek je vrlo blizu udarnog ruba noža, a pravac koji ide ovim rubom prolazi vrlo blizu osi rotacije. Umjesto određivanja težine njihala F_l i udaljenosti L između težišta njihala i osi rotacije jednostavnije je odrediti silu F koja djeluje na poznatoj udaljenosti l_2 od osi i koja ima isti moment u odnosu na os kao i težina njihala. U tu svrhu njihalo je potrebno podignuti tako da njegovo težište leži u horizontalnoj ravnini s obzirom na os rotacije (tj. praktično da je rub noža u horizontalnoj ravnini s osi). Na udaljenosti l_2 od osi nož treba poduprti u jednoj točki drugim nožem okomitim na prvi. Ovaj drugi nož mora biti učvršćen na dinamometru. Pomoću uređaja za mjerenje sile treba izmjeriti silu F koju vrši njihalo i udaljenost l_2 s točnošću od 0,2 % (slika 15).



Slika 15. Prikaz geometrije njihala

Moment njihala (M) slijedi iz izraza:

$$M = F \cdot l_2$$

gdje je: F [N] sila, a l_2 [m] udaljenost od osi rotacije.

Tada je potrebno izmjeriti kut pada njihala α . Ovo mjerenje treba načiniti s točnošću od $\pm 0,065^\circ$. Kut α može biti veći od 90° . Potencijalna energija bata se računa iz izraza:

$$A_p = M \cdot (1 - \cos\alpha) = F \cdot l_2 \cdot (1 - \cos\alpha)$$

Gubici trenja

Na lom ispitnog uzorka utroši se određena energija jednaka razlici potencijalnih energija na početku i kraju prve poluoscilacije njihala. Na tu energiju mogu utjecati određeni gubici koji nastaju zbog:

- trenja uzrokovano povlačenjem kazaljke,
- trenja u ležajevima i otpora zraka.

Da bi se odredili gubici zbog povlačenja kazaljke istu treba pomaknuti u položaj koji odgovara kutu penjanja nula, te otpustiti njihalo iz početnog položaja (kut pada α), ali bez ispitnog uzorka na osloncima i očitati kut penjanja β_1 ili direktno energiju E_1 . Potom se bez

vraćanja kazaljke njihalo pusti ponovno padati iz položaja koji odgovara kutu pada α i očitava se novi kut penjanja β_2 ili direktno energija E_2 . Gubici trenja u pokazivaču (p) slijede iz jednadžbe:

$$p = M \cdot (\cos\beta_1 - \cos\beta_2)$$

kada je skala podijeljena u stupnjevima ili

$$p = E_1 - E_2$$

kada je skala podijeljena u jedinicama energije.

Za ovaj proračun koriste se srednje vrijednosti β_1 i β_2 (ili E_1 i E_2) iz četiri mjerenja.

Gubici trenja u ležajevima i otpora zraka određuju se za jednu poluoscilaciju klatna. Nakon određivanja β_2 ili energije E_2 njihalo se vraća u početni položaj. Bez ponovnog namještanja kazaljke njihalo se pusti da napravi 10 poluoscilacija. Kada njihalo započne jedanaestu polu-oscilaciju kazaljka se vraća za otprilike 5 % ispod dostignute krajnje vrijednosti i bilježi se kut β_3 (ili energija E_3). Gubici trenja u ležajevima i gubici uslijed otpora zraka (p') za jednu poluoscilaciju slijede iz jednadžbi:

$$p' = \frac{1}{10} M \cdot (\cos\beta_3 - \cos\beta_2)$$

kada je skala podijeljena u stupnjevima ili

$$p' = \frac{1}{10} \cdot (E_3 - E_2)$$

kada je skala podijeljena u jedinicama energije.

Ukupni gubici $p+p'$ ne smiju biti veći od 0,5 % nazivne energije bata A_N .

Brzina bata

Brzina udara bata mora biti između 5,0 i 5,5 m/s. Međutim, za uređaje proizvedene prije 1983. god., dozvoljava se brzina između 4,5 i 7 m/s. Vrijednost brzine udara (v) određuje se iz izraza:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos\alpha)}$$

gdje je:

- v - brzina [m/s],
- g - ubrzanje zemljine sile teže ($g=9,81 \text{ m/s}^2$),

- α - kut pada [°],
- L - udaljenost centra noža do osi rotacije njihala [m].

Mjerno područje

Energija koja se utroši na lom epruvete ne smije biti veća od 80% nazivne energije bata. Ako ona ipak prelazi ovu vrijednost to je potrebno je zabilježiti u ispitnom izvještaju. Idealno ispitivanje bi bilo pri konstantnoj brzini udara bata. Međutim, brzina se smanjuje kako lom napreduje pa za uzorke čija je žilavost blizu nazivne energije uređaja brzina bata se toliko smanji da više nije moguće s dovoljnom točnošću odrediti vrijednost udarnog rada loma.

2.2. Karakteristike žilavosti

Različite karakteristike žilavosti općenito definiraju sposobnost materijala da apsorbira energiju preko plastične deformacije odnosno da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala prema lomu. Mjere za žilavost predstavljaju različite karakteristike mehaničkih svojstva, koje se utvrđuju ispitivanjima uzoraka, u pravilu u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitni uzorci mogu biti glatki ili zarezani ovisno već o karakteristici koja se ispituje.

2.2.1. Karakteristike žilavosti određene na zarezanim ispitnim uzorcima

2.2.1.1. Udarni rad loma – KU ili KV

Udarni rad loma utvrđuje se po Charpyjevoj ili Izodovoj metodi na ispitnim uzorcima kvadratnog presjeka s utorom (zarezom) u obliku slova U ili V tako da je oznaka udarnog rada loma KU ili KV. Kod polimernih materijala uzorci mogu biti neurezani. Mjera žilavosti je energija utrošena za lom ispitnog uzorka. Detaljniji opis Charpyjeve i Izodove metode dan je u poglavljima 2.3.1. i 2.3.4.

2.2.1.2. Prijelazna temperatura žilavosti

Prijelazna temperatura žilavosti \mathcal{G}_p u uskoj je vezi s udarnim radom loma. Kako udarni rad loma za većinu metalnih materijala ovisi o temperaturi, tako prijelazna temperatura označava visinu temperature na prijelazu s visokih prema niskim vrijednostima udarnog rada loma. Iznad te temperature može se očekivati žilavo, a ispod nje krhko ponašanje materijala.

2.2.1.3. Granična temperatura žilavosti

Granična temperatura žilavosti ($\mathcal{G}_{50\%}$ ili $\mathcal{G}_{85\%}$) ispituje se na uzorku s utorom s padajućim utegom (engl. *Drop Weight Tear Test – DWTT*). Mjera žilavosti su granične temperature $\mathcal{G}_{50\%}$ ili $\mathcal{G}_{85\%}$ pri kojima zagasiti dio prijelomne površine iznosi 50% odnosno 85% ukupne površine. Ovako ispitivanje provodi se najčešće na limovima od feritnih čelika debljine 3-13mm.

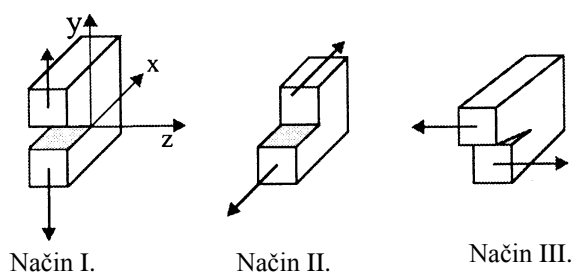
2.2.1.4. Temperatura duktilnosti

Temperatura duktilnosti određuje se na uzorku s navarom u kojem je izrezan utor. Udarno opterećenje ostvaruje se padajućim utegom (engl. *Drop Weight Test – DWT*). Mjera žilavosti je temperatura NDT (engl. *Nil Ductility Transition*), tj. ona je najviša temperatura pri kojoj napuklina prodire kroz čitav presjek ispitnog uzorka. Ispod NDT temperature može se očekivati krhko ponašanje materijala, iako je iznos nominalnog naprezanja niži od granice razvlačenja. Ova se ispitivanja provode na limovima debljine veće od 13mm.

2.2.1.5. Lomna žilavost

Lomna žilavost (K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC}) je mehaničko svojstvo materijala koje pokazuje otpornost materijala prema širenju napuklina. Ispituje se na uzorcima koji imaju utor i umjetno izazvanu napuklinu. Mjera za žilavost je kritični faktor intenzivnosti naprezanja na vrhu napukline koji u uvjetima ravninskog stanja deformacije dovodi do njenog nestabilnog širenja. Te kritične vrijednosti nazivaju se lomnom ili pukotinskom žilavošću. Od svih karakteristika koje govore o žilavosti jedino lomna žilavost može služiti kao proračunska veličina. Ispitivanje lomne žilavosti provodi se na svim vrstama materijala, a posebno onim čvrstim i relativno krhkim.

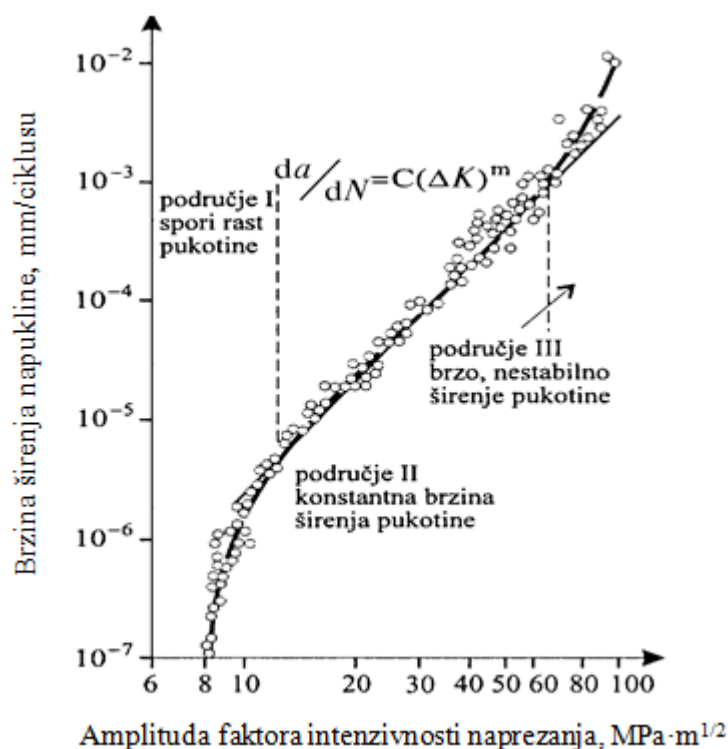
S obzirom na način (modus) otvaranja napukline razlikuju se i veličine lomne žilavosti K_{IC} , K_{IIC} i K_{IIIC} ovisno o tomu je li napuklina nastala jednostavnim otvaranjem, uzdužnim ili poprečnim smicanjem, slika 16.



Slika 16. Načini otvaranja napukline

Najveće značenje u praksi ima način I., posebice kod dijelova s vanjskim i unutarnjim napuklinama, opterećenih vlačnim ili savojnim opterećenjem te kod konstrukcija podvrgnutih unutarnjem pritisku.

Slika 17 prikazuje utjecaj amplitude faktora intenzivnosti naprezanja na brzinu rasta napukline u uvjetima promjenljivog opterećenja.



Slika 17. Utjecaj amplitude faktora intenzivnosti naprezanja na brzinu rasta napukline

Rast napukline pri promjenljivom opterećenju općenito karakterizira brzina njezina širenja da/dN u ovisnosti o amplitudi faktora intenzivnosti naprezanja ΔK :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \cdot \alpha$$

gdje je: $\Delta\sigma$ – raspon naprezanja,

a – duljina napukline (pogreške),

α – korekturni faktor određen geometrijom dijela i oblikom napukline (pogreške).

Širenje napukline općenito se odvija u tri stadija: inicijalizacija napukline (I), stabilna propagacija ili podkritično širenje napukline (II) i naglo nadkritično napredovanje napukline

do loma (III). Početne napukline kao posljedica lijevanja, oblikovanja deformiranjem, obrade odvajanjem čestica, korozije, trošenja i sl. mogu, ali i ne moraju brzo napredovati u uvjetima kratkotrajnog ili dugotrajnog statičkog ili dinamičkog opterećenja. U velikom broju slučajeva uvjeti za nestabilno širenje napukline nisu unaprijed ispunjeni već se postižu, kroz duži ili kraći vremenski period, postupnim rastom inicijalne napukline pod djelovanjem opterećenja. Kod visokočvrstih čelika kritično naprezanje potrebno za inicijalizaciju napukline ovisi o tvrdoći osnove, ali i o veličini, obliku i raspodjeli nemetalnih uključaka te ostalih čestica sekundarnih faza. Stoga otpornost ovih čelika prema pojavi i širenju napukline raste porastom njihove čistoće. Pojavi mikronapuklina općenito pogoduju vlačna naprezanja u površinskim slojevima, dok tlačna naprezanja uvedena toplinskom obradom (npr. cementiranjem ili površinskim kaljenjem), hladnom ili toplom preradom, sačmarenjem i sl. smanjuju opasnost od površinskih napuklina. U području I na slici 17, pri niskim vrijednostima amplitude faktora intenzivnosti naprezanja napuklina sporo napreduje šireći se malom brzinom ($da/dN < 10^{-5}$ mm/ciklusu). U ovom području krivulja se približava graničnoj vrijednosti faktora intenzivnosti naprezanja ΔK_0 ispod koje postojeća napuklina ili pogreška neće propagirati. Na veličinu ΔK_0 najviše utječu mikrostruktura materijala, oblik promjenljivog opterećenja i iznos srednjeg naprezanja te okolni medij. Pri višim vrijednostima amplitude faktora intenzivnosti naprezanja, u području II, napuklina započinje stabilno propagirati šireći se konstantnom brzinom od 10^{-5} do 10^{-3} mm/ciklusu. U tom području vrijedi Paris-Erdoganova jednadžba:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

Faktor “C” i eksponent “m” ovise o vrsti i stanju materijala, srednjem naprezanju i utjecaju okolnog medija, a određuju se ispitivanjima. Paris-Erdoganova jednadžba za aluminijske toplinski očvrstljive legure definirana je izrazom:

$$\frac{da}{dN} = 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot (\Delta K)^3$$

dok za titanove legure ova jednadžba poprima oblik:

$$\frac{da}{dN} = 3,55 \cdot 10^{-9} \cdot (\Delta K)^4$$

gdje je ΔK u $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

U području III pri visokim vrijednostima amplitude faktora intenzivnosti naprezanja, nakon što ΔK dosegne kritičnu vrijednost ΔK_c (vrijednost lomne žilavosti) dolazi do brzog nestabilnog širenja napukline koje na kraju rezultira lomom.

Vrijednost lomne žilavosti omogućava određivanje kritičnog naprezanja pri kojem dolazi do loma statički opterećenih dijelova konstrukcija, uzimajući u obzir pogreške u materijalu nastale tijekom izrade ili uporabe. Na taj se način može provjeriti pouzdanost konstrukcije za poznato naprezanje i veličinu pogreške. Posebnu primjenu u tom smislu nalazi ova vrijednost kod proračuna dijelova i elemenata zrakoplova koji u eksploataciji moraju biti sigurni.

Poznavanjem lomne žilavosti moguće je proračunati i kritičnu veličinu pogreške (napukline) koja će dovesti do loma pri zadanom napreznju. Maksimalna veličina pogreške (a) proizlazi iz izraza:

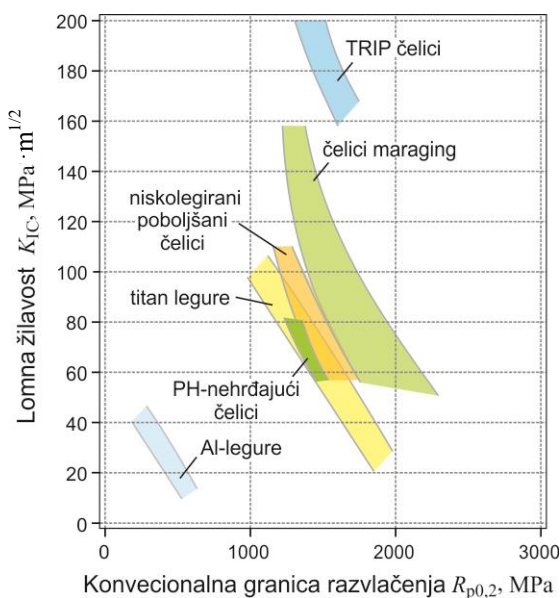
$$a = \left(\frac{f^2}{\pi \cdot \alpha^2} \right) \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0,2}} \right)^2$$

gdje je: f – omjer granice razvlačenja i radnog naprezanja.

Dakle, usporedba materijala na osnovi tolerirane veličine pogreške (napukline) proizlazi iz omjera lomne žilavosti i granice razvlačenja. Što je taj omjer viši, to se dozvoljava veća (duža) napuklina, odnosno pogreška u mikrostrukтури materijala pri definiranim konstrukcijskim faktorima. Nasuprot tome, materijali s niskim omjerom $K_{IC}/R_{p0,2}$ osjetljivi su na postojanje mikrostrukturnih pogrešaka i napuklina i kod njih se dozvoljava tek vrlo mala napuklina. To su materijali poput visokočvrstih čelika, ali i neželjezni metali poput aluminijevih i titanovih legura. Visokočvrsti čelici poput TRIP i “maraging” čelika, niskolegiranih poboljšanih te precipitacijski očvrnutih korozijski postojanih čelika (PH-čelika) namijenjenih izradi visokoopterećenih tankostjenih konstrukcija vrlo su osjetljivi na inicijalizaciju i širenje napukline. To je naročito izraženo u uvjetima vlačnog opterećenja kada naprezanja lako dosežu kritičan iznos pri kojem napuklina započinje nestabilno propagirati šireći se velikom brzinom što u konačnici uzrokuje lom. Kod takvih materijala osjetljivih na zarezno (urezno) djelovanje, dimenzioniranje i proračun konstrukcije mora se temeljiti na vrijednosti lomne žilavosti. Uobičajeni pristup proračunu nosivosti s pomoću faktora sigurnosti i dopuštenih naprezanja nije prihvatljiv, posebice u slučajevima kada se radi o dijelovima velikih dimenzija, niskim radnim temperaturama, promjenljivom ili udarnom opterećenju te u prisutnosti agresivne okoline.

Osim o naprezanju, obliku i dimenzijama napukline, lomna žilavost ovisi o sastavu i mikrostrukturi materijala. Vrijednosti lomne žilavosti bitno se razlikuju za pojedine skupine i podskupine materijala (od $0,63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ za neojačane polimere do $411 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ za nelegirane čelike) te predstavljaju selektivni kriterij za razlikovanje njihove žilavosti. Žilavim se u pravilu smatraju oni materijali čija vrijednost K_{IC} prelazi $60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Što je granica razvlačenja viša, to je lomna žilavost niža, kako to ilustrira slika 18.



Slika 18. Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke metale

Ovaj obrnuto proporcionalni odnos granice razvlačenja i lomne žilavosti istovjetan je odnosu čvrstoće i “klasične” žilavosti određene po Charpyju (udarni rad loma).

Lomna žilavost polimernih kompozita

Za polimere ojačane kontinuiranim vlaknima lomnu žilavost je teško procijeniti zbog kompleksnog širenja napukline što je posljedica interakcije matrice i vlakana. Minimalne vrijednosti lomne žilavosti treba očekivati u slučajevima kada napuklina napreduje kroz matricu bez interakcije s vlaknima. Najviše vrijednosti lomne žilavosti se dostižu kada dolazi do premošćenja napuklina. Kod kompozita s kontinuiranim vlaknima to nastupa kada vlakna premošćuju napukline i trebaju biti izvučena iz matrice ili prelomljena da bi napuklina propagirala.

Lomna žilavost drva

Lomna žilavost drva K_{IC} je znatno niža ako napuklina propagira u smjeru vlakana te je drvo jednostavnije raskoliti u uzdužnom smjeru nego u poprečnom. Da bi se izbjegla zbrka s vrijednošću K_{IC} s obzirom na ravninu i smjer propagacije napukline kod drvnih materijala vrijednost $K_{IC\perp}$ definira lomnu žilavost gdje napuklina siječe vlakna a $K_{IC\parallel}$ lomnu žilavost za smjer propagiranja napukline paralelan sa vlaknima. Lomna žilavost ovisi i o gustoći pojedinih drvnih vrsta.

2.2.2. Karakteristike žilavosti određene ispitivanjima na glatkim ispitnim uzorcima

2.2.2.1. Tlačni (sabojni) udarni rad

Ispitivanje se provodi na cilindričnim ispitnim uzorcima sa $L_0 = d_0$. Mjera žilavosti je rad utrošen na definirano sabijanje, sveden na volumen ispitnog uzorka. Ova relativno rijetka karakteristika koristi se poglavito kao mjera oblikovljivosti materijala deformiranjem.

2.2.2.2. Savojni udarni rad

Ispituje se na uzorcima okruglog i kvadratnog presjeka po Charpyevoj ili Izodovoj metodi uz djelovanje udarnog opterećenja. Mjera žilavosti je energija utrošena na lom ili progib ispitnog uzorka (ako uzorak nije slomljen). Ovo ispitivanje se uglavnom provodi za krhke materijale – alatni čelici, željezni ljevovi, sinterirani materijali, duromeri....

2.2.2.3. Probojni udarni rad

Ispituju se ploče i folije od polimernih materijala. Svojnaci različite mase i oblika udarne glave spuštaju se s neke visine. Mjera žilavosti je udarni rad potreban za probijanje ili progib uzorka.

2.2.2.4. Kut uvijanja

Ispituje se djelovanjem momenta uvijanja na cilindrični uzorak. Mjera žilavosti je kut uvijanja pri kojem se javljaju prve napukline. Ovakvo ispitivanje poglavito se provodi kod termodifuzijski obrađenih materijala.

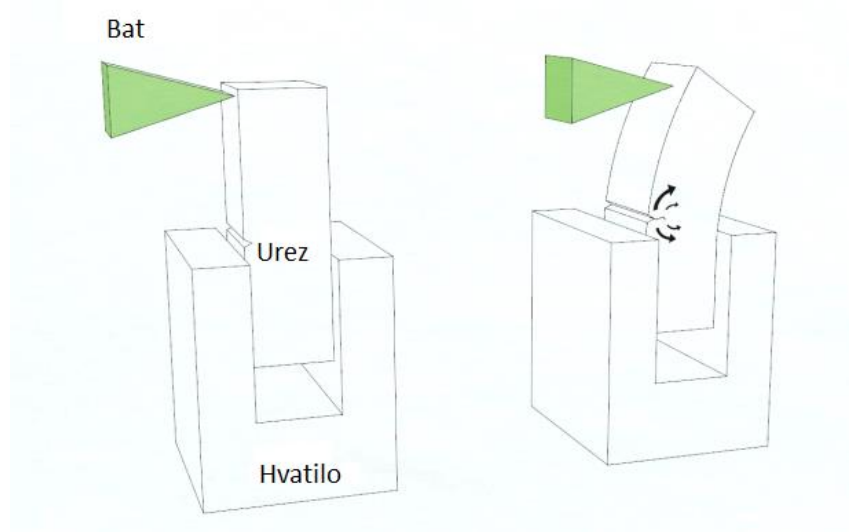
2.3. Metode ispitivanja žilavosti

Najčešće metode ispitivanja žilavosti u uvjetima udarnog opterećenja su:

- ispitivanje udarnog rada loma na Charpyevom batu,
- ispitivanje udarnog rada loma po Izodu,
- temperatura nulte duktilnosti po Pelliniju,
- dinamička sila loma po Bruggeru,
- tehnološka ispitivanja udarom.

2.3.1. Udarna rad loma po Izodu

Kod ovog ispitivanja ispitni se uzorak konzolno učvrsti tako da se utor nalazi sa strane udara bata. Utor na ispitnom uzorku osigurava koncentraciju naprezanja, onemogućava plastičnu deformaciju i na taj način dovodi do loma ispitnog uzorka na tom mjestu, slika 19.



Slika 19. Shematski prikaz ispitivanja po Izodu

Udarni rad loma prema Izodu je mjerilo otpora materijala prema udarnom opterećenju i definiran je utrošenom kinetičkom energijom potrebnom za lom ispitnog uzorka. Veličina izmjerenog udarnog rada loma po Izodu ne predstavlja neko fundamentalno mehaničko svojstvo materijala već svojstvo prema kojem se materijali mogu rangirati u pogledu njihove žilavosti. Iskazuje se u J/m^2 odnosno utrošeni rad dijeli se s površinom poprečnog presjeka ispitnog uzorka na mjestu loma. Gornja granična vrijednost pri kojoj materijali ne pucaju kod ovog ispitivanja iznosi $600\text{--}610 \text{ kJ/m}^2$. Često se rezultati daju i u J/m jer je jedna dimenzija

uzorka prema normi konstantna. Prema gruboj procijeni vrijednost iskazana u J/m oko 10 je puta veća od one iskazane u J/m². Ponekad se uz pretpostavku da su obje dimenzije poprečnog presjeka definirane normom rezultat udarnog rada loma iskazuje u J.

Za polimerne materijale udarni rad loma prema Izodu određuje se prema normi ASTM D256A na ispitnom uzorku debljine 3,2 mm.

Udarne energija za drvo utvrđuje se sukladno EN normi koja propisuje dimenzije ispitnog uzorka 10 × 10 × 280 mm. Rad utrošen za lom ispitnog uzorka može se i ne mora dijeliti s ploštinom poprečnog presjeka koja iznosi 100 mm².

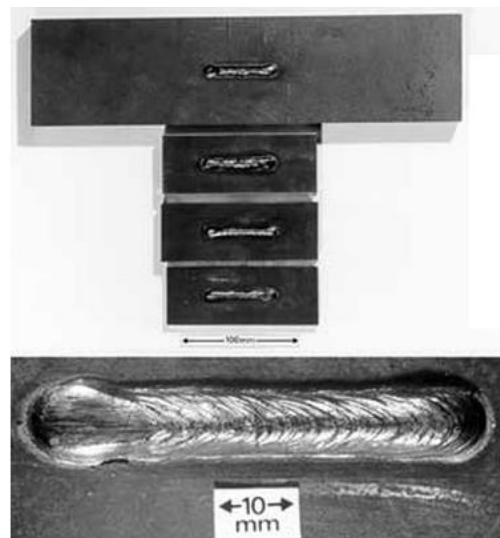
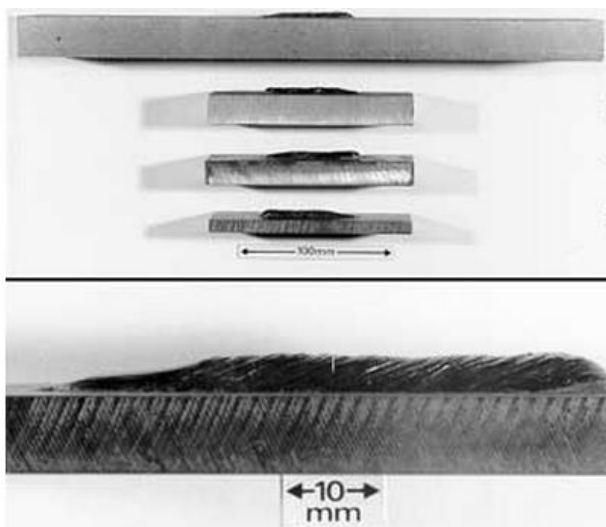
2.3.2. Temperatura nulte duktilnosti prema Peliniju

Ispitivanje po Peliniju je razvijeno u mornaričkom ispitnom laboratoriju u Washingtonu kao jednostavna metoda za određivanje temperature nulte duktilnosti materijala (NDTT). Temperatura nulte duktilnosti je definirana 1950. godine kao temperatura pri kojoj ploča ostaje ravna nakon loma eksplozijom, odnosno širenje pukotine nastaje samo u prisutnosti elastičnih naprezanja.

Današnje ispitivanje nije puno drugačije od osnovnog samo je pojednostavljeno za korištenje i standardizirano normom ASTM E208.

Ispitivanje se vrši na pravokutnom uzorku s krhkim navarom na jednoj strani uzorka. Udarne opterećenje se ostvaruje padajućim utegom (engl. *Drop Weight Test*). Kod ovog ispitivanja uzorak se oslanja na oslonac, a navar na sebi ima urez iz kojeg se inicira pukotina pri slobodnom padu utega.

Ispitnim uzorcima se tijekom ispitivanja mijenja temperatura kako bi se odredila maksimalna temperatura pri kojoj nastupa lom. Početna temperatura najčešće je procijenjena temperatura nulte duktilnosti tako da se ovo ispitivanje provodi u temperaturnim intervalima od po 5°C. Na slici 20 prikazan je izgled ispitnih uzoraka, dok slika 21 detaljnije prikazuje navar s gornje strane ispitnog uzorka.



Slika 20. Ispitni uzorci za ispitivanje po Peliniju Slika 21. Prikaz navara na ispitnim uzorcima

Danas postoje različite izvedbe uređaja kojima se ispituje temperatura nulte duktilnosti prema Peliniju. Suvremene izvedbe Pelinijevog uređaja s padajućim utegom razlikuju se po količini energije koju uređaj može proizvesti prilikom ispitivanja. Na slici 22 prikazan je uređaj s rasponom energije od 340 do 1630 J dok su na slikama 23 i 24 prikazani uređaji većeg mjernog područja od 6500 do 30000 J odnosno 15000 do 80000 J.



Slika 22. Suvremena izvedba Pellinija za male iznose energija



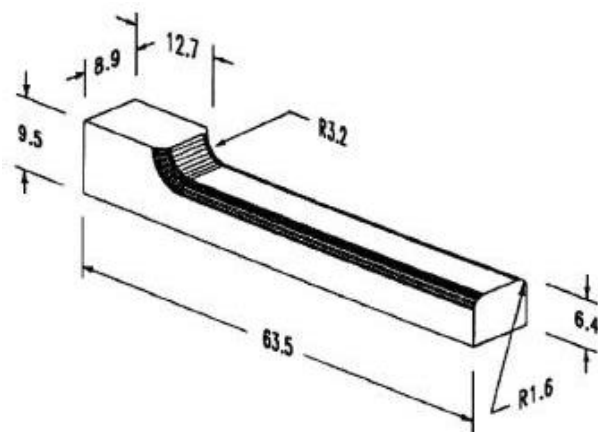
Slika 23. Suvremena izvedba Pellinija za srednje iznose energija



Slika 24. Suvremena izvedba Pellinija za velike iznose energija

2.3.3. Dinamička sila loma po Bruggeru

Ispitivanje po Bruggeru osmišljeno je za kontrolu žilavosti kaljenih čelika kada klasična Charpyeva ili Izodova metoda nisu dovoljne u kontroli kvalitete proizvoda. Naime, različiti strojni dijelovi poput zupčanika često otkazuju tijekom eksploatacije uslijed savijanja zuba zupčanika ili pucanja njegova vrha jer ne postoji metoda za ispitivanje žilavosti toplinski obrađenih kaljenih i popuštenih čelika. Zato je osmišljen postupak u kojem ispitni uzorak s prijelaznim radijusom opterećuje udarnim opterećenjem. Uzorak se sastoji od prijelaznog dijela koji predstavlja zub zupčanika, slika 25.



Slika 25. Prikaz Bruggerovog uzorka

Bruggerov uzorak se učvršćuje na takav način da bat udara cijelu površinu. Sila pri kojoj uzorak puca je parametar koji se vrednuje kao udarna otpornost materijala. Zbog sličnosti sa Charpyevim ispitivanjem često su ispitni uređaji tako konstruirani da omogućuju oba ispitivanja kao što je vidljivo na slici 26.



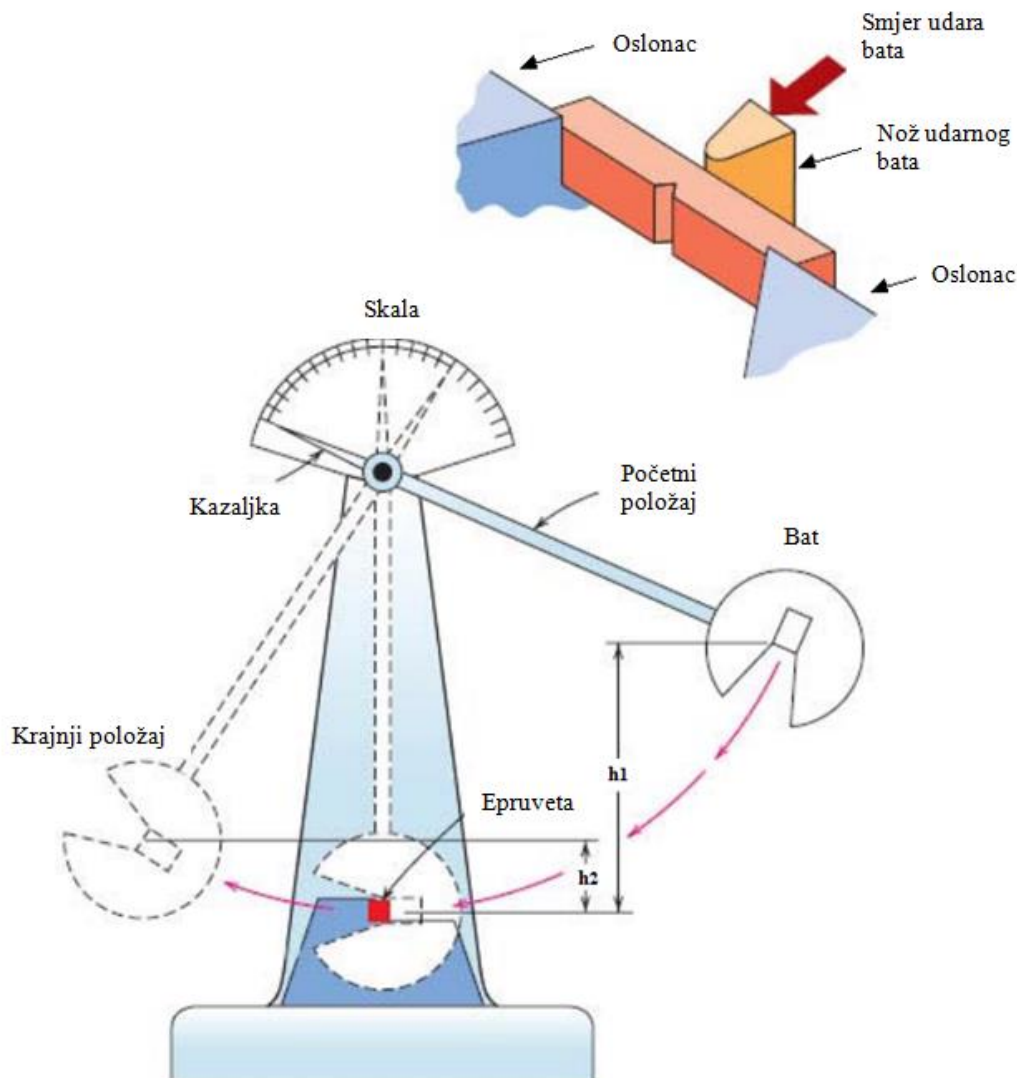
Slika 26. Višefunkcionalni ispitni uređaj za ispitivanje po Charpyu i Bruggeru

2.3.4. Udarni rad loma po Charpyu

Ispitivanje udarnog rada loma po Charpyu provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Iznos udarnog rada loma pokazatelj je "žilavosti" ili "krhkosti" materijala. Ispitivanje udarnog rada loma Charpyevim batom propisano je normom HRN EN ISO 148-1. Na slici 27 prikazan je Charpyev bat i njegovi osnovni dijelovi:

- postolje s njihalom,
- udarni bat s nožem,

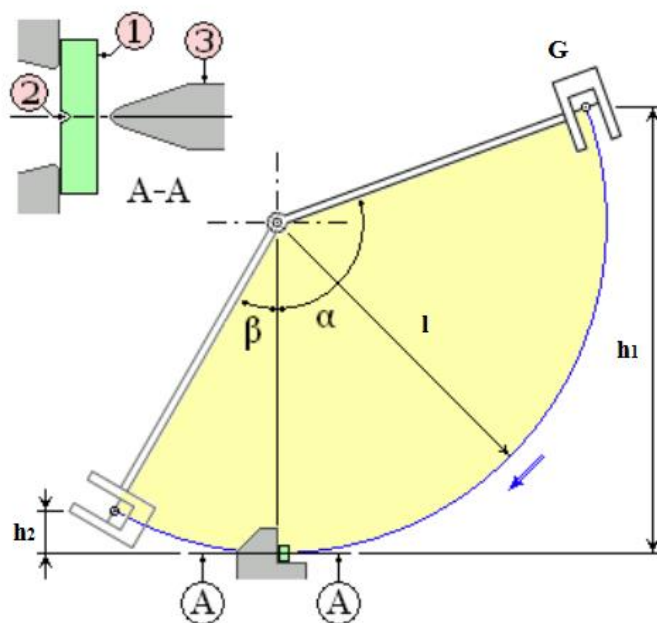
- oslonci epruvete,
- mjerna skala (analogna ili digitalna).



Slika 27. Shematski prikaz ispitivanja po Charpyu

Bat težine G podiže se na visinu h_1 te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju $G \cdot h_1$ ($N \cdot m = J$). Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku. U tom trenutku brzina bata (v) iznosi oko 5,5 m/s. Ukoliko na oslonce nije postavljen ispitni uzorak bat se penje na istu visinu s koje je pušten, jasno ako se zanemari trenje u ležaju i trenje zbog povlačenja kazaljke i otpora zraka.

Kod starijih uređaja na mjernom dijelu moguće je očitati samo kutove α i β gdje α predstavlja kuta pada dok β predstavlja kut penjanja udarnog bata (slika 28). Do potrebnih rezultata dolazi se naknadnim preračunavanjem. Zbog unapređenja samog ispitnog postupka kasnije je uvedena mjerna skala s podjelom u jedinicama energije i mogućnošću očitavanja raspoloživog i preostalog rada ili direktnog očitavanja energije utrošene na lom epruvete.



Slika 28. Shematski prikaz kutova Charpyevog bata

1 – epruveta; 2 – zarez na epruveti ; 3 – nož udarnog bata

Na presjeku A-A prikazan je smjer udara bata s obzirom na položaj epruvete na osloncima.

Današnji, moderni elektronički uređaji pružaju niz prednosti u odnosu na klasične uređaje pa se tako i rezultat mjerenja direktno očitava na digitalnom pokazivaču koji je sastavni dio Charpyevog bata. Na slikama 29, 30 i 31 prikazane su različite izvedbe bata od onih najstarijih pa sve do onih koji se koriste u vrhunskim ispitnim i umjernim laboratorijima.



Slika 29. Klasični Charpey bat s mjernom skalom



Slika 30. Suvremena izvedba Chrapyevog bata za male iznose energija



Slika 31. Suvremena izvedba Chrapyevog bata za velike iznose energija

Uređaj na kojem se provodi ispitivanje mora biti sljediv do nacionalnog ili međunarodnog etalona i mora se redovito umjeravati. Charpyev bat mora biti postavljen i ispitan sukladno normi HRN EN ISO 148-2.

2.3.4.1. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka

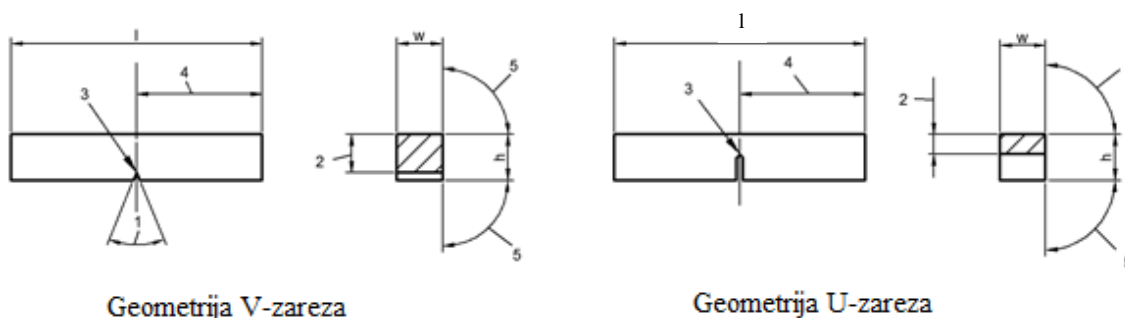
Standardni ispitni uzorak (eproveta) dužine je 55 mm te širine i visine 10 mm. Na sredini ispitnog uzorka nalazi zarez koji može biti u obliku slova „V“ (V-zarez) ili slova „U“ (U-zarez).

Ako se iz materijala ne može izrezati standardni ispitni uzorak koriste se uzorci reduciranog presjeka širine 7,5 mm, 5 mm, 2,5 mm.

Ispitni uzorak mora imati površinsku hrapavost R_a bolju od $5 \mu\text{m}$ na svim površinama osim bočnim.

Kada se ispituje toplinski obrađeni materijal ispitni uzorak (uključujući i zarez) strojno se obrađuje nakon zadnje faze toplinske obrade, osim u slučaju kada je moguće dokazati da mehanička obrada prije toplinskog tretiranja nema bitnog utjecaja na rezultate.

Zarez se mora pažljivo obraditi tako da na polumjeru korijena zarez nema tragova strojne obrade jer oni mogu štetno utjecati na apsorbiranu (utrošenu) energiju tj. energiju koja se utroši na lom uzorka. Ravnina simetrije zarez mora biti okomita na uzdužnu os ispitnog uzorka. Geometrija Charpyevih epruveta s V- i U-zarezom predložena je na slici 32.



Slika 32. Ispitni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma po Charpyu

(Oznake l, h, w i brojevi 1 do 5 opisani su tablicama 3 i 4)

U tablicama 3 i 4 detaljno su predložene dimenzije i tolerancije ispitnih uzorka s V- i U-zarezom. V-zarez mora imati kut od 45° i dubinu od 2 mm te polumjer korijena od 0,25 mm (slika 32, tablica 3). U-zarez mora imati dubinu 5 mm (osim ako nije drugačije određeno) i polumjer korijena od 1 mm (slika 32 tablica 4).

Tablica 3. Dimenzije i tolerancije uzorka sa V-zarezom

Oznaka	Simbol i broj	Ispitni uzorak s V-zarezom		
		Nazivna dimenzija	Tolerancije obrade	Klasa tolerancije ^a
Dužina	l	55 mm	±0,60 mm	js15
Visina ^b	h	10 mm	±0,075 mm	js12
Širina ^b	w	10 mm	±0,11 mm	js13
- Standardni ispitni uzorak		7,5 mm	±0,11 mm	js13
- Ispitni uzorak reduciranog presjeka		5 mm	±0,06 mm	js12
- Ispitni uzorak reduciranog presjeka		2,5 mm	±0,05 mm	js12
Kut zarez	1	45°	±2°	-
Visina ispod zarez (visina uzorka minus dubina zarez)	2	8 mm	±0,075 mm	js12
Polumjer zakrivljenosti vrha zarez	3	0,25 mm	±0,025 mm	-
Udaljenost ravnine simetrije zarez i kraja uzorka ^b	4	27,5 mm	±0,42 mm ^c	js15
Kut između ravnine simetrije zarez i uzdužne osi uzorka		90°	±2°	-
Kut između susjednih uzdužnih površina uzorka	5	90°	±2°	-

Tablica 4. Dimenzije i tolerancije uzorka sa U-zarezom

Oznaka	Simbol i broj	Ispitni uzorak s U-zarezom		
		Nazivna dimenzija	Tolerancije obrade	Klasa tolerancije ^a
Dužina	l	55 mm	±0,60 mm	js15
Visina ^b	h	10 mm	±0,11 mm	js13
Širina ^b	w	10 mm	±0,11 mm	js13
Visina ispod zarez (visina uzorka minus dubina zarez)	2	5 mm	±0,09 mm	js13
Polumjer zakrivljenosti vrha zarez	3	1 mm	±0,07 mm	js12
Udaljenost ravnine simetrije zarez i kraja uzorka ^b	4	27,5 mm	±0,42 mm ^c	js15
Kut između ravnine simetrije zarez i uzdužne osi uzorka		90°	±2°	-
Kut između susjednih uzdužnih površina uzorka	5	90°	±2°	-
a – sukladno ISO 286-1 b – ispitni uzorak mora imati površinsku Ra hrapavost bolju od 5 µm, osim na krajevima c – kod strojeva s automatskim pozicioniranjem uzorka, preporuča se tolerancija ±0,165 mm umjesto ±0,42 mm				

Prilikom izrade ispitnog uzorka potrebno je minimizirati bilo kakve promjene uzrokovane primjerice zagrijavanjem ili očvršćavanjem uslijed hladne deformacije. Prije ispitivanja ispitni uzorak se mora označiti na bilo kojoj površini koja nije u kontaktu s horizontalnim i vertikalnim osloncima ili nožem da bi se izbjegao utjecaj plastične deformacije i površinskih nepravilnosti na apsorbiranu (utrošenu) energiju koja se mjeri tijekom ispitivanja.

2.3.4.2. Ispitna temperatura

Ispitivanje se u pravilu provodi na temperaturi od 23 ± 5 °C osim ako nije drugačije navedeno. Temperatura ispitnog uzorka mora ostati u granicama ± 2 °C.

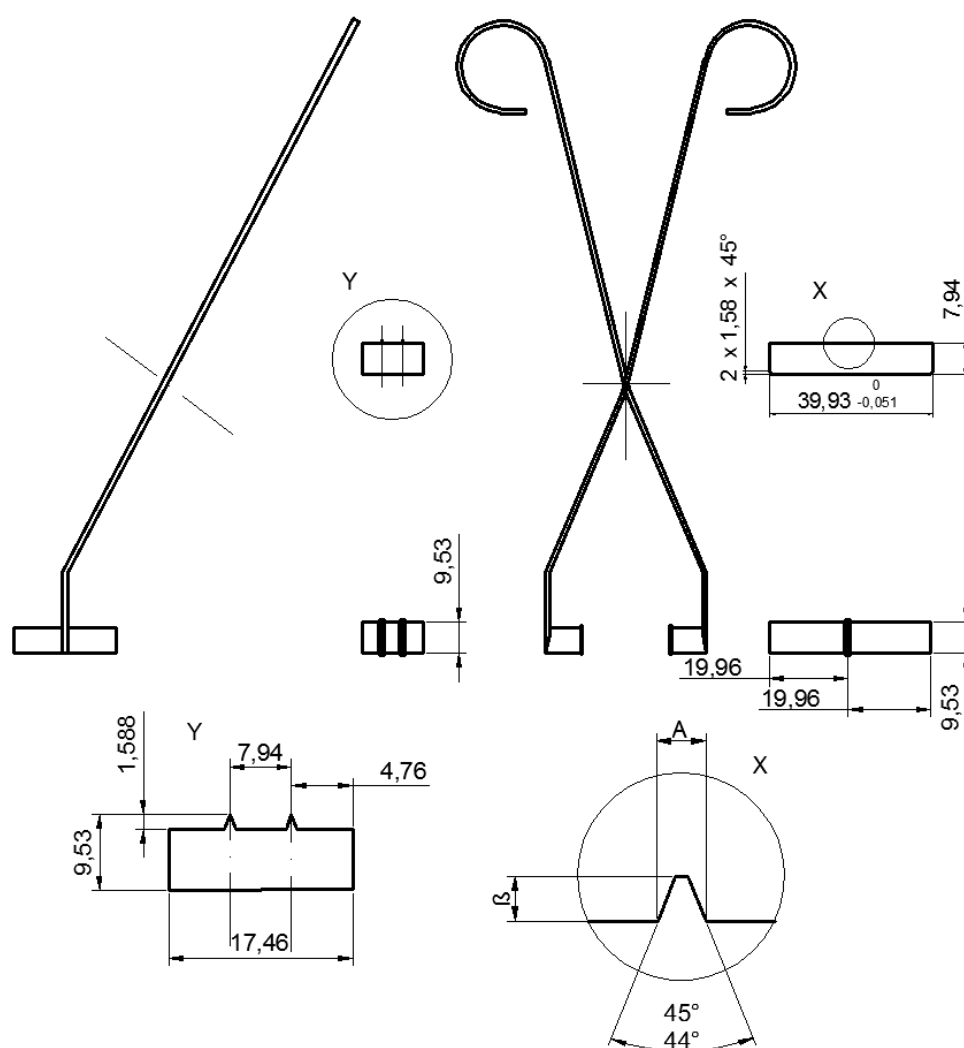
U slučaju zagrijavanja ili hlađenja korištenjem tekućeg medija ispitni uzorak se mora smjestiti u posudu tako da leži na mrežici koja je barem 25 mm iznad dna posude i mora biti prekriven s najmanje 25 mm tekućine te udaljen od stranica posude barem 10 mm. Medij treba postepeno zagrijavati/hladiti dok ne dostigne određenu temperaturu. Uređaj za mjerenje temperature medija treba pozicionirati točno na centar skupine ispitnih uzoraka, a temperaturu medija treba održavati u granicama od ± 1 °C najmanje 5 min.

U slučaju zagrijavanja ili hlađenja korištenjem plinovitog medija ispitni uzorak u komori mora biti udaljen od najbliže površine minimalno 50 mm. Pojedinačni ispitni uzorci moraju biti razmaknuti barem 10 mm. Medij treba neprestano cirkulirati i održavati određenu temperaturu na neki od konvencionalnih načina. Uređaj za mjerenje temperature medija treba pozicionirati točno na centar skupine ispitnih uzoraka, a temperaturu plinovitog medija treba održavati u granicama od ± 1 °C barem 30 min.

2.3.4.3. Prenos ispitnog uzorka

Kada se ispituje na temperaturi različitoj od okolišne ne smije proći više od 5 s od vađenja uzorka iz medija do udara noža. Uređaj za prijenos (hvataljke) uzorka mora biti tako konstruiran i uporabljen da održava temperaturu ispitnog uzorka unutar dozvoljenog temperaturnog područja. Mora se paziti da hvataljke prilikom prijenosa ne uzrokuju pukotine na uzorku.

Za ispitne uzorke s V-zarezom često se koriste samo-centrirajuće hvataljke za prijenos uzorka iz medija za zagrijavanje ili hlađenje na položaj za ispitivanje, slika 33. Ovakve hvataljke eliminiraju moguće probleme nastale međudjelovanjem prelomljenih dijelova uzorka i uređaja za centriranje.



Slika 33. Hvataljka za centriranje ispitnih uzoraka s V-zarezom

Tablica 5 sadrži dimenzije hvataljke s obzirom na širinu uzorka.

Tablica 5. Dimenzije hvataljke

Širina uzorka	Širina baze A	Visina B
10	1,60 do 1,70	1,52 do 1,65
5	0,74 do 0,80	0,69 do 0,81
3	0,45 do 0,51	0,36 do 0,48

2.3.4.4. Zaglavljenje ispitnog uzroka

Zaglavljenje se javlja u slučaju kada se prelomljeni ispitni uzorak zateče između gibajućih i negibajućih dijelova ispitnog uređaja. To može rezultirati značajnom apsorpcijom (utroškom) energije. U slučaju zaglavljenja ispitnog uzorka na uređaju, rezultate treba zanemariti, a uređaj potpuno pregledati radi oštećenja koja bi mogla utjecati na umjeravanje.

2.3.4.5. Naknadni pregled

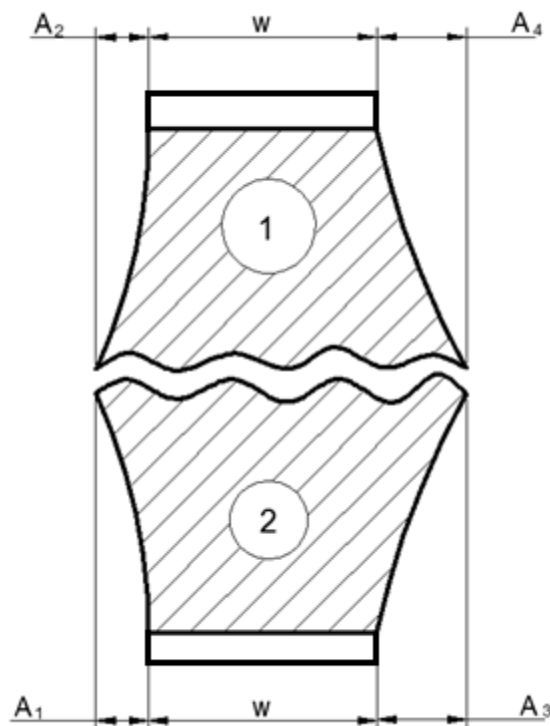
Ako se naknadnim pregledom pokaže da se bilo koji dio oznake ispitnog uzorka nalazi na dijelu koji je vidljivo deformiran rezultat nije nužno vjerodostojan i to treba zabilježiti u izvješću o ispitivanju.

2.3.4.6. Lateralno (bočno) širenje

Sposobnost materijala da se odupre lomu kada je podvrgnut troosnom naprezanju, poput onog u korijenu zareza Charpyevog ispitnog uzorka, iskazuje se iznosom deformacije na mjestu loma. Deformacija nastaje kontrakcijom materijala. Pošto je teško mjeriti ovu deformaciju čak i nakon loma, mjeri se širenje koje se javlja na suprotnom kraju prijelomne plohe i ono se koristi kao mjera kontrakcije.

Kod metode mjerenja lateralnog (bočnog) širenja treba uzeti u obzir da je prijelomna ploha rijetko jednako proširena na obje strane ispitnog uzorka. Jedna polovica ispitnog uzorka može biti maksimalno proširena na obje strane, samo jednoj ili ni jednoj. Stoga se kao mjera širenja koristi veličina koja je jednaka zbroju većih od dvije vrijednosti na svakoj strani pri zasebnom mjerenju dvije polovice uzorka. Veličinu širenja na svakoj strani svake polovice uzorka treba mjeriti s obzirom na nedeformiranu stranu ispitnog uzorka (vidi sliku 34). Širenje se može mjeriti pomoću mjernog sata nalik onom na slici 35. Mjerenje se provodi na dvije polovice uzorka. Prvo se provjeravaju strane okomite na zarez da bi se provjerilo da na ovim stranama nisu formirane nikakve neravnine tijekom ispitivanja; ako neravnine postoje, one se trebaju ukloniti, primjerice brušenjem brusnim papirom, ali tako da se ne bruse proširenja koja se mjere. Zatim se dvije polovice uzorka stavljaju jedna na drugu tako da leže na površinama suprotnim zarezu. One se čvrsto pritisnu uz referentnu ravninu tako da proširenja leže naspram igle mjernog sata. Mjere se vrijednosti na istoj strani pri čemu veća vrijednost reprezentira širenje na toj strani. Postupak se ponavlja mjerenjem proširenja na drugoj strani i potom se zbrajaju veće vrijednosti. Na primjer ako je $A_1 > A_2$ i $A_3 = A_4$ tada je $LE = A_1 + (A_3 \text{ ili } A_4)$, Ako je $A_1 > A_2$ i $A_3 > A_4$ onda je $LE = A_1 + A_3$. Ako je jedno ili više

proširenja ispitnog uzorka oštećeno u kontaktu s osloncima ispitni uzorak se ne smije mjeriti i to treba zabilježiti u izvješću o ispitivanju. Potrebno je izmjeriti svaki ispitni uzorak.



Slika 34. Dvije prelomljene polovice Charpyevog V-uzorka i dimenzije A_1, A_2, A_3, A_4 kao mjere bočnog širenja



Slika 35. Mjerni sat za mjerenje bočnog širenja

2.3.4.7. Izvješće o ispitivanju

Izvješće o ispitivanju mora sadržavati barem slijedeće informacije:

- referencu na norme niza HRN EN ISO 148 tj. HRN EN ISO 148-1:2009,
- identifikaciju ispitnog uzorka (vrsta materijala),
- vrstu zareza,
- veličinu ispitnog uzorka, ako nije standardni,
- temperaturu ispitnog uzorka,
- apsorbiranu (utrošenu) energiju KV_2 , KV_8 , KU_2 ili KU_8 ,
- bilo kakve nepravilnosti koje mogu utjecati na ispitivanje.

Izvješće može sadržavati i dodatne informacije kao što su:

- orijentacija ispitnog uzorka (ISO 3785),
- nazivna energija bata,
- veličina lateralnog širenja,
- izgled prijeloma, udio smičnog loma,
- dijagram apsorbirane (utrošene) energije i temperature,
- prijelazna temperatura i kriterij određivanja,
- broj ispitnih uzorka koji nisu potpuno prelomljeni,
- mjerna nesigurnost.

3. ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA PO CHARPYU

Cilj ispitivanja udarnog rada loma pri sniženim i niskim temperaturama je utvrđivanje korelacije između žilavosti i temperature te definiranje prijelazne temperature koja označava prijelaz iz žilavog u krko područje. Ispitivanje udarnog rada loma po Charpyu provedeno je prema normi ISO 148-1 u Laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Metoda po Charpyu primjenjuje se za ispitivanje ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja.

3.1. Ispitivanje kemijskog sastava

Ispitivanje kemijskog sastava provedeno je u Laboratorij za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Prilikom analize korišten je instrument „LECO GDS 850A“ prikazan slikom 36. Ovaj uređaj namijenjen je za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije.

Da bi se obavila analiza, potrebno je pobuditi atome. To se može postići na više načina (plamenom, električnom plazmom i električnim izbojem), a u zadnje vrijeme u formi luka i iskre i kao najnovije, tinjajućim izbojem, tj. plazmom (ioniziranim plemenitim plinom-argonom).

Plazma (ionizirani argon) skida uzorak s površine, u plazmi uzorak disocira na atome, dalje slijedi pobuda atoma u plazmi. Elektroni u atomu iz osnovnog stanja prelaze u pobuđeno stanje, tj. na viši energijski nivo, nakon otprilike 10 ns, elektron se vraća u osnovno stanje, tj. na energijski niži nivo. Energija oslobođena tim procesom, emitira se u formi svjetlosnog kvantuma. Ta razlika energije, kao i valna dužina emitiranog svjetla, specifična je za svaki atom. Na taj način omogućena je identifikacija atoma. Intenzitet svjetla određen je udjelom elemenata u uzorku. Svjetlost nastala u tom procesu prolazi kroz spektrometar i koristi se za analizu. Svjetlost prolazi najprije kroz primarnu pukotinu, zatim na rešetku i reflektira se pod kutem (koji ovisi o valnoj dužini) te prolazi kroz sekundarnu pukotinu na fotomultiplikator.

Struja proizvedena u fotomultiplikatoru proporcionalna je količini emitiranog svjetla. Mnogo takvih fotomultiplikatora sa sekundarnom pukotinom mogu biti postavljeni u spektrometru, da se može istovremeno analizirati odgovarajući broj elemenata u uzorku.

Da bi se analizirali nepoznati uzorci, potrebna je analitička metoda koja daje korelaciju između udjela pojedinog elementa i mjenenog intenziteta. Stoga je potrebno prije analize uređaj baždari (kalibrirati) sa standardnim uzorcima čiji je kemijski sastav poznat i točno određen (u tu svrhu se koriste ili certificirani referentni materijali ili referentni materijali).

Instrument može kvalitativno analizirati slijedeće uzorke: nisko legirani čelici, visoko legirani čelici, sivi lijev, nodularni lijev, Al-legure i Cu-legure.



Slika 36. Optički emisijski spektrometar GDS 850A

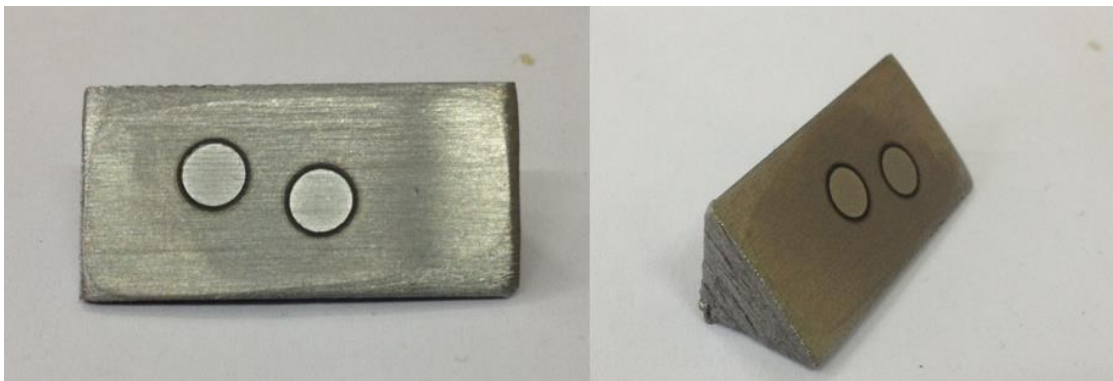
Analizom sastava ispitnog uzorka utvrđeno je da je riječ od niskougljičnom čeliku čiji je sastav prikazan tablicom 6.

Tablica 6. Kemijski sastav

Oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
1	0,11	0,15	0,55	0,019	0,046	0,07	0,12	0,02	0,48	ostatak

Na temelju udjela karakterističnih elemenata može se zaključiti da se radi o ugljičnom nelegiranom čeliku oznake C10.

Na slici 37 prikazan je analizirani ispitni uzorak i tragovi nastali optičkom emisijskom spektrometrijom.



Slika 37. Ispitni uzorak nakon kemijske analize

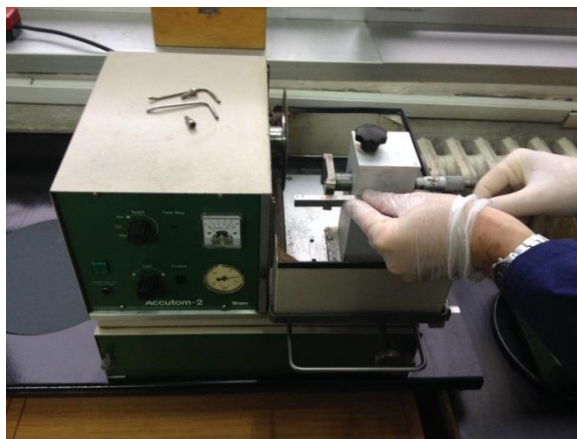
3.2. Ispitivanje mikrostrukture

Da bi se provela metalografska analiza potrebna je odgovarajuća priprema uzorka. Metalografska priprema ovisi o vrsti materijala i opremi na kojoj se provodi mikrostrukturna analiza. Postoje dvije vrste ispitivanja: svjetlosna (optička) i elektronska mikroskopija.

Priprema uzorka za svjetlosnu mikroskopiju sastoji se od slijedećih faza:

1. rezanje uzorka,
2. zalijevanje u polimerni materijal,
3. brušenje,
4. poliranje,
5. nagrivanje.

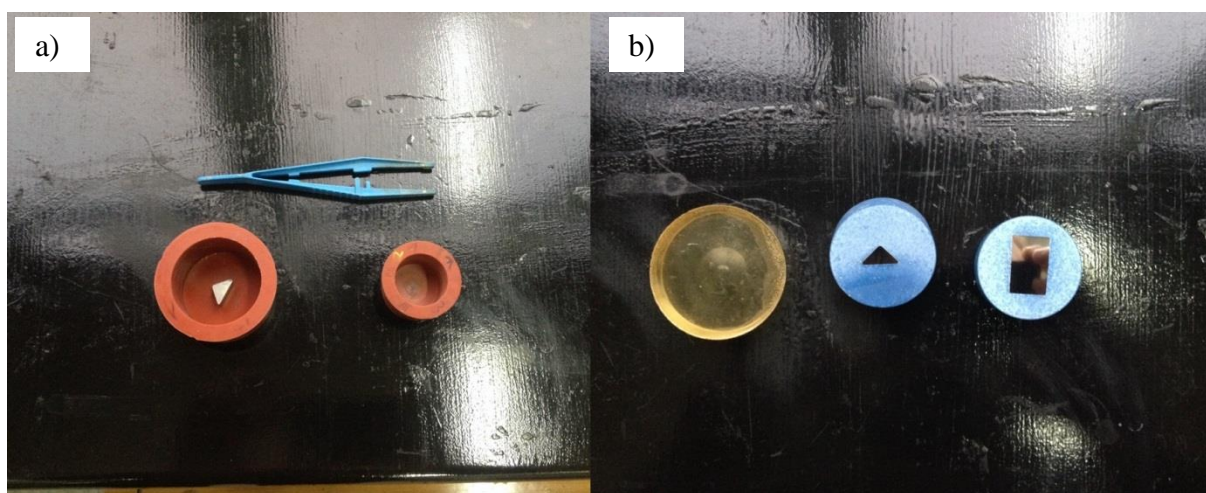
Rezanje uzorka na rezalici (slika 38) provedeno je uz obilno hlađenje kako bi se onemogućile mikrostrukturne transformacije uslijed zagrijavanja.



Slika 38. Uređaj za rezanje uzoraka

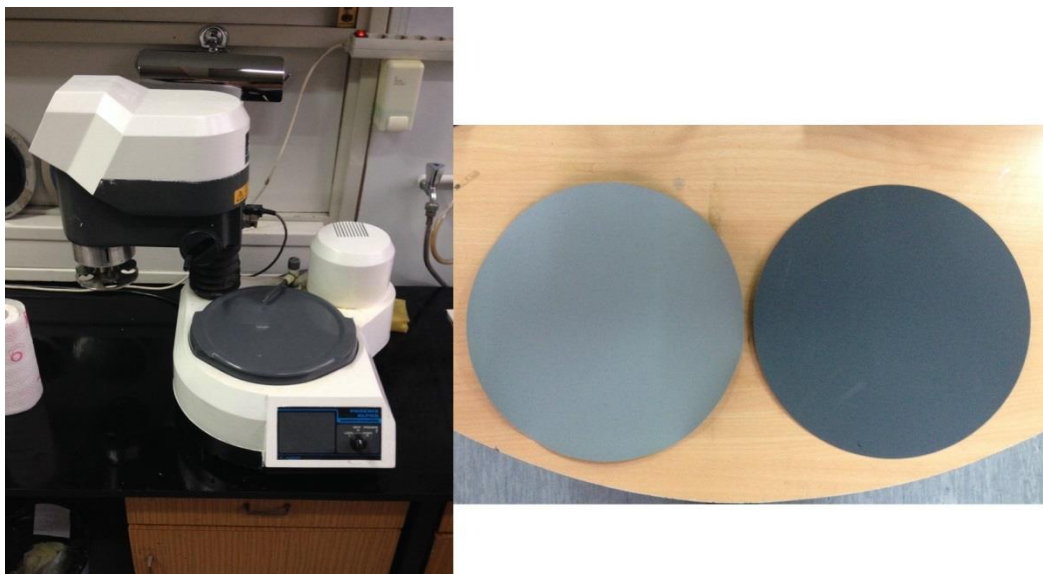
Uzorak se izrezuje ne samo za potrebe metalografske analize već i radi određivanja kemijskog sastava materijala.

Nakon rezanja slijedi operacija zalijevanja uzorka u polimernu masu. Uzorak pozicioniran na sredinu kalupne šupljine zaliven je plavom akrilnom polimernom masom (*VariDur 3000*). Ova masa nakon 30-40 min stvrdne tako da se uzorak može dalje pripremati. Za zalijevanje se koriste i druge mase, kao što je npr. bakelitna masa, epoksidna smola i sl. Epoksidna smola je najkvalitetnije sredstvo za zalijevanje. Na slici 39a) su prikazani kalupi koji se koriste za lijevanje, a na slici 39b) mogu se vidjeti gotovi već zaliveni uzorci.



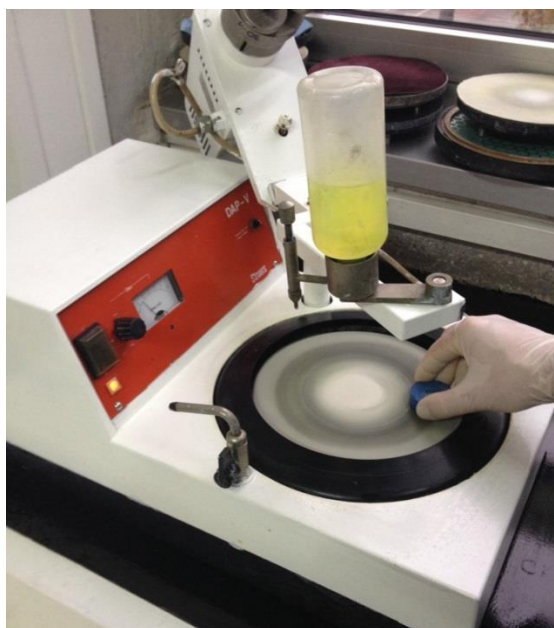
Slika 39. a) Kalupi za zalijevanje b) Uzorak nakon zalijevanja

Nakon zalijevanja slijedi brušenje uzorka. Uzorak se brusi brusnim papirom na rotirajućem disku brzinom od 300 okr/min. Brušenje započinje s grubim brusnim papirom, velike granulacije brusnog zrna te se postepeno prelazi na sve finiji brusni papir manje granulacije zrna (sitnija zrna). U radu su korišteni brusni papiri sa silicij karbidnim abrazivom i to redom kako slijedi: P320, P600, P1200, P2500, P4000. Prije svake promjene brusnog papira uzorak se mora isprati kako bi se uklonila zrna zaostala iz prethodnog brušenja. U suprotnom ova bi zrna stvorila riseve tijekom daljnjeg brušenja. Za vrijeme brušenja također je potrebno hladiti vodom. Na slici 40 predložen je uređaj za brušenje marke: Buehler, vrste: Phoenix alpha koji je korišten u ovom radu.



Slika 40. Uređaj za brušenje uzorka s različitim brusnim papirima

Nakon brušenja slijedi poliranje uzorka. Poliranje se također provodi na rotirajućem disku na kojem se nalazi svilena tkanina s nanešenom dijamantnom pastom. Dijamantna pasta sadrži abraziv potreban za poliranje. Slično kao i brušenje i poliranje započinje grubljim abrazivom da bi na koncu slijedilo završno poliranje finom dijamantnom pastom. U ovoj fazi uzorak se hladi emulzijom *MetaDi Fluid* koja bolje odvodi sitne čestice i bolje štiti uzorak tijekom poliranja nego voda. Brzina rotirajućeg diska pri poliranju iznosi 150 okr/min. Polirka na kojoj je provedeno poliranje tipa je DAP-V, proizvođač: Struers, slika 41.



Slika 41. Uređaj za poliranje uzorka

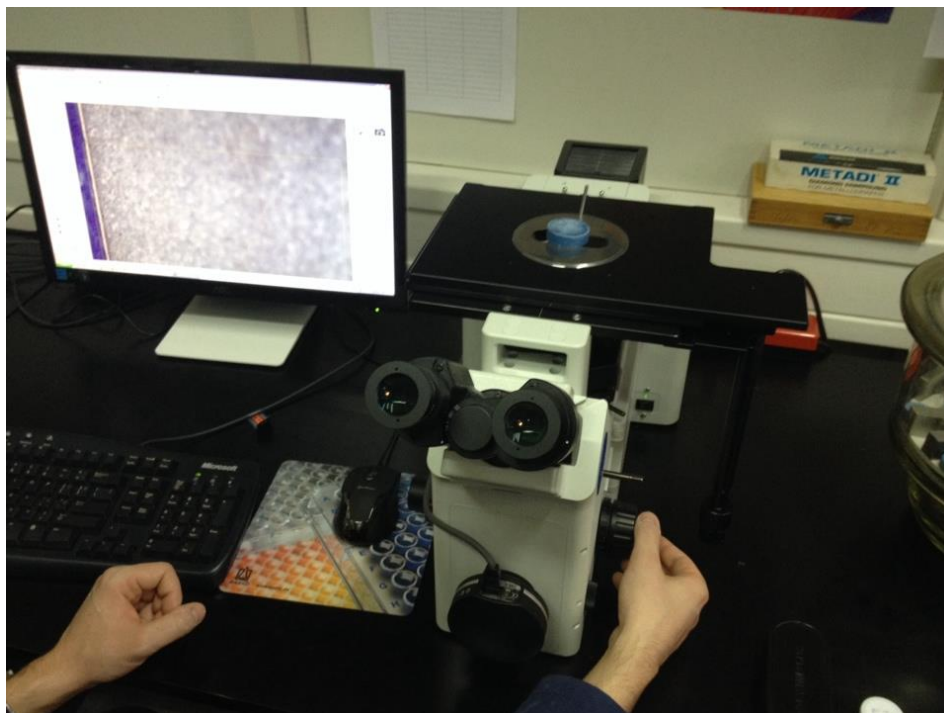
Nakon poliranja uzorak se ispiru 96% etilnim alkoholom kako bi se uklonile površinske zaostale nečistoće.

Budući da se za mikroskopiranje koristi svjetlosni (optički) mikroskop, koji radi na principu refleksije zraka svjetlosti, uzorak se mora nagrizzati (jetkati). Nagrizzati se može cijelo kristalno zrno ili samo njegove granice. Za nagrizzanje se koriste različite otopine ovisno o vrsti materijala. Sredstvo za nagrizzanje odabire iz odgovarajućih metalografskih priručnika. Ako se radi o čeliku, kao u ovom slučaju, koristi se otopina 3% dušične kiseline (HNO_3) i alkohola (nital: 2-4 ml HNO_3 i 96- 98 ml $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Alkohol odmašćuje površinu, a dušična kiselina nagrizza fazu s negativnijim elektropotencijalom. Time ta faza postaje hrapava. Zrake svjetlosti, unutar optičkog mikroskopa, drugačije se odbijaju ovisno o tome da li je površina glatka ili nije. Zrake koje se odbijaju od nagrizenih zrna neće padati u okular i stoga se to područje slike odnosno ta faza vidi kao tamno područje. S druge strane, zrake svjetlosti koje se reflektiraju od nenagrizenih, glatke faze, lome se pod takvim kutom da upravo padaju u okular te je ta faza predočena svijetlim područjem slike. Slika 42 prikazuje proces nagrizzanja uzorka.



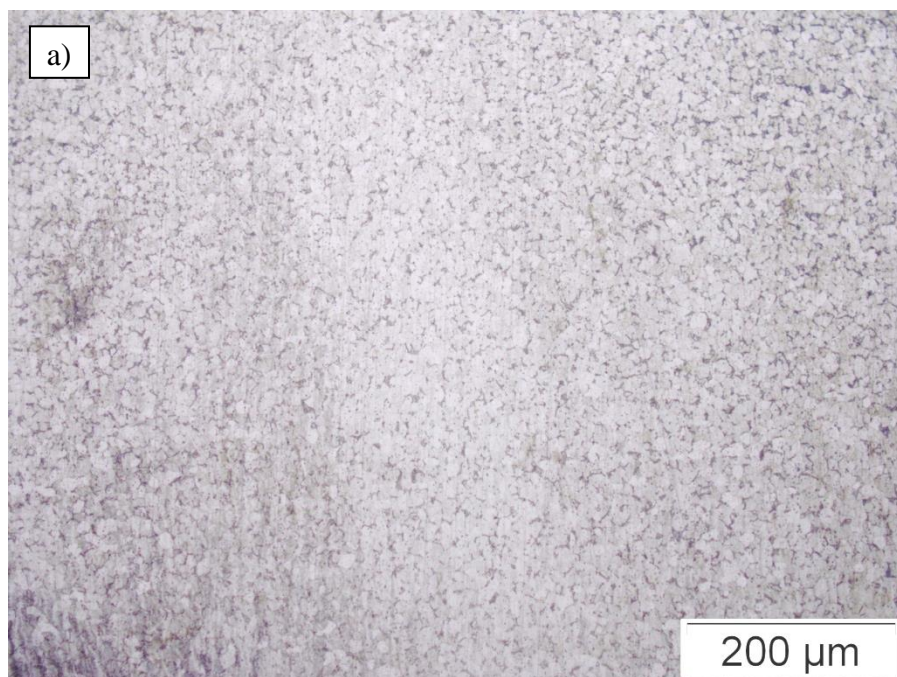
Slika 42. Nagrizzanje uzorka

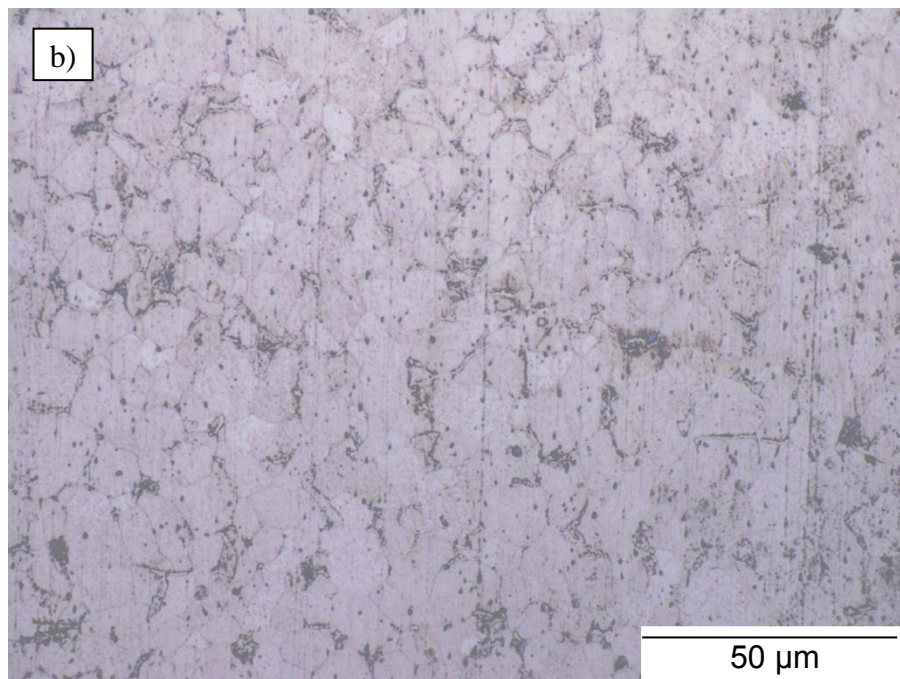
Nagrizeni uzorak analizira se na svjetlosnom mikroskopu kako bi se ispitala mikrostruktura i odredili konstituenti. U radu je korišten optički mikroskop Olympus vrste GX5 (slika 43) s povećanjima 50, 100, 200, 500 i 1000 puta.



Slika 43. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu

Ispitivanjem mikrostrukture utvrđeno je da se radi o čeliku pretežno feritne mikrostrukture (svjetla zrna) s malim udjelom perlita (tamna zrna), slika 44, što se moglo očekivati na temelju rezultata kemijske analize.





Slika 44. Mikrostruktura uzorka pri povećanju:

- a) 200x**
- b) 1000x**

3.3. Ispitna oprema i postupak

Prije početka ispitivanja potrebno je označiti ispitne uzorke kako se oni nebi pomiješali tijekom daljnjeg rukovanja i ispitivanja. Stoga je svaka epruveta na svom kraju obilježena velikim slovom vodeći računa da nastali otisak ne utječe na rezultate ispitivanja.

Na slici 45 mogu se vidjeti različiti utiskivači i postupak utiskivanja oznaka, dok su na slici 46 prikazane već označene epruvete, njih ukupno 18, koje će biti ispitane u daljnjem radu.

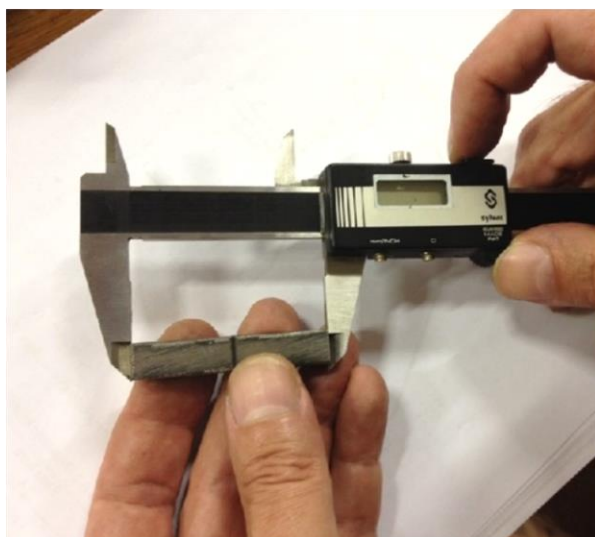


Slika 45. Utiskivanje oznake na epruvetu i različiti utiskivači



Slika 46. Set označenih epruveta

Radi se o standardnim ispitnim uzorcima dimenzija $55 \times 10 \times 10$ mm s V-zarezom dubine 2 mm napravljenim pod kutom od $45^\circ \pm 2^\circ$. Budući da dimenzije epruvete moraju biti unutar dozvoljenih tolerancija definiranih tablicom 3 na svakoj epruveti izmjerene su tri karakteristične dimenzije: dužina, širina i visina, slika 47, tablica 7.

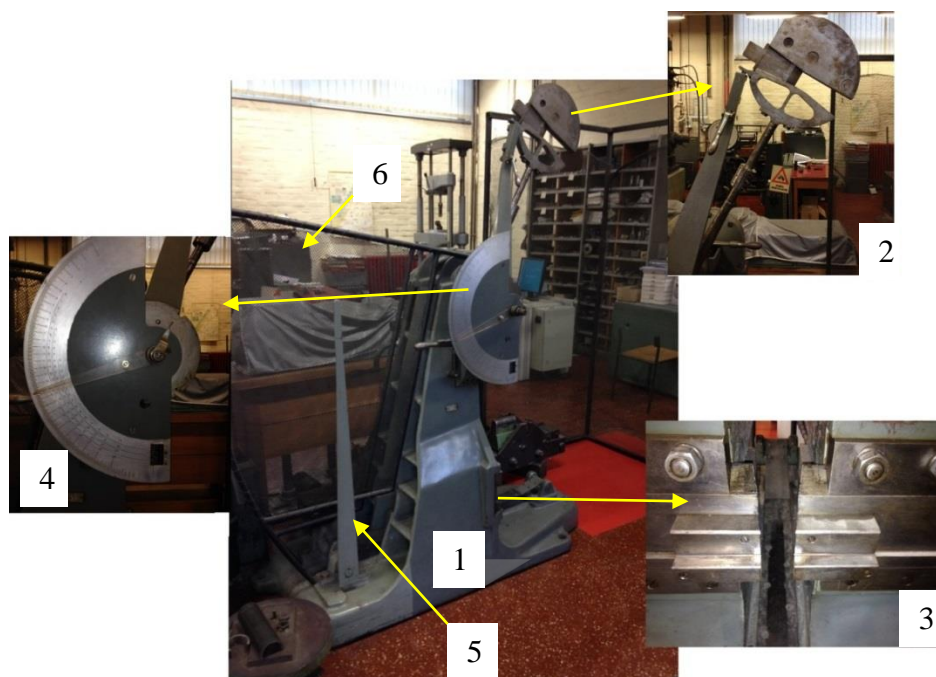


Slika 47. Mjerenje dimenzija ispitnog uzorka

Tablica 7. Dimenzije ispitnih uzoraka

Oznaka epruvete	Dužina	Širina	Visina
A	55,09	10,13	10,05
B	55,11	10,09	10,07
C	54,95	10,10	10,01
D	55,01	10,01	10,10
E	55,12	10,09	10,09
F	54,96	10,13	10,10
H	55,05	10,12	10,05
I	55,11	10,18	10,13
J	55,00	10,11	10,15
K	55,01	10,08	10,11
L	54,99	10,02	10,08
M	55,13	10,14	10,06
O	55,18	10,04	10,12
P	54,92	10,03	10,02
R	54,96	10,06	10,07
S	54,98	10,12	10,09
T	55,01	10,07	10,06
V	55,02	10,02	10,05

Za ispitivanje udarne radnje loma korišten je Charpev bat nazivne energije 300 J proizveden u Mađarskoj (proizvođač: AVK), tip: UT30, serijski broj 71007, slika 48.



Slika 48. Charpyev bat za ispitivanje udarnog rada loma

Prikazani Charpyev bat sastoji se od sljedećih dijelova:

1. postolje,
2. njihalo s udarnim batom,
3. oslonci epruvete,
4. mjerna skala,
5. kočnica
6. zaštitna ograda

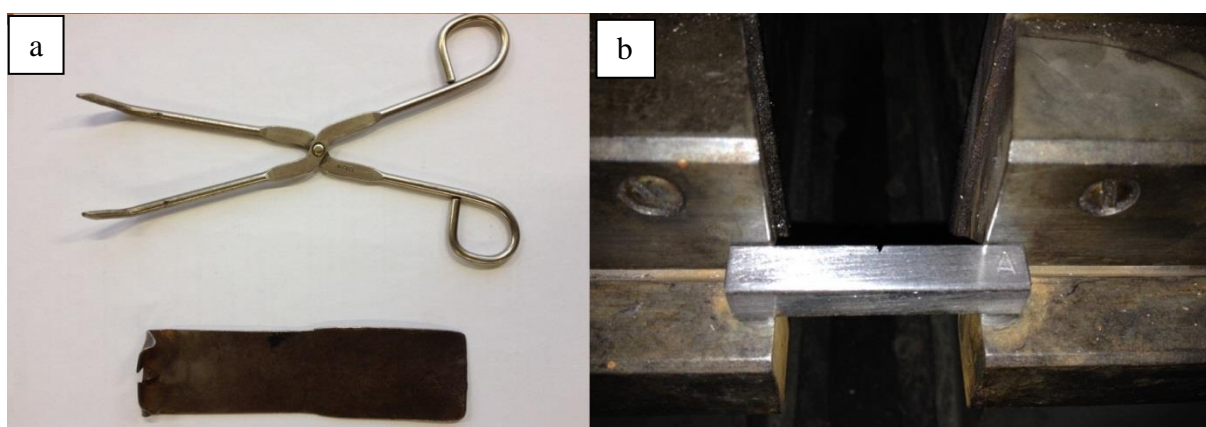
Slika 49 predočava nož udarnog bata s polumjerom 2 mm.



Slika 49. Prikaz noža na udarnom batu

Prije početka mjerenja bat se pušta u rad bez epruvete na osloncima, tj. pušta se da slobodno pada kako bi se približno odredili gubici trenja zbog povlačenja kazaljke, trenja u ležajevima i otpora zraka. Prilikom ovog ispitivanja zabilježena je vrijednost odstupanja od 1,0 J što je skoro zanemarivo s obzirom na maksimalnu energiju bata.

Mjerenje udarnog rada loma prvo je provedeno na epruvetama oznaka A, B i C koje su ispitane na okolišnoj temperaturi (25°C). Ispitivanje započinje podizanjem bata u početni položaj (h_1) i njegovim fiksiranjem. Nakon toga se epruveta uz pomoć hvataljki i naprave za centriranje postavljanja na oslonce. Slika 50a) prikazuje pribor za prenošenje i centriranje epruvete dok je na slici 50b) prikazan položaj epruvete na osloncima.



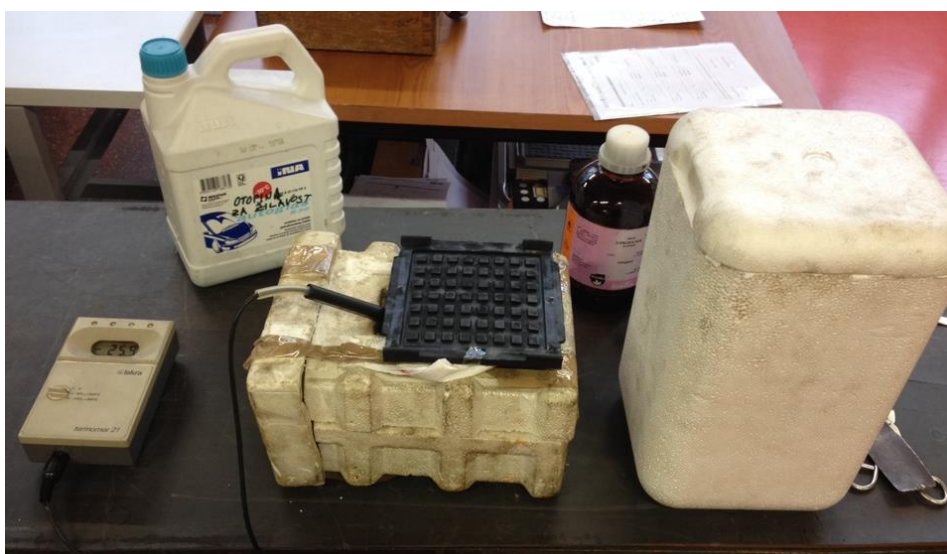
Slika 50. Pribor za prenošenje i centriranje epruvete (a); položaj epruvete na osloncima (b)

Nakon centriranja epruvete otpušta se udarni bat koji udara u epruvetu na strani suprotnoj zarezu. Udarni bat lomi epruvetu u potpunosti ili samo djelomično na što se utroši određeni dio kinetičke energije bata. Zbog toga se bat u uzlaznom dijelu putanje podiže na visnu manju od početne, a na skali uređaja očitava se rad utrošen na lom epruvete. Postupak se ponavlja sve dok se ne ispitaju sve tri epruvete na sobnoj temperaturi.

Za potrebe ispitivanja ispod okolišne temperature epruvete se moraju hladiti do određene temperature. Hlađenje je provedeno pomoću suhog leda - mješavine CO₂ i alkohola. Slika 51 prikazuje spremnik od ekspandiranog polistirena u kojem se čuva CO₂ i epruvete oznaka R, S i T koje se hlade na -78°C. Uzorci su držani na toj temperaturi 5 min kako bi po cijelom presjeku postigli traženu temperaturu.

**Slika 51. Spremnik s CO₂**

Da bi se ispitivanje provelo na temperaturama $-78\text{ }^{\circ}\text{C} < \vartheta < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ potrebno je dodavati alkohol. Što ima više alkohola i manje CO₂ tim je temperatura viša. Miješanje CO₂ s alkoholom provedeno je u novom spremniku koji sadrži metalnu posudu. Mjerenje temperature provedeno je pomoću digitalnog termometra čiji je proizvođač ISKRA, vrsta: ODT0302, serijski broj: 0002902 u mjernom području -100°C do $+200^{\circ}\text{C}$. Rezolucija ovog uređaja iznosi $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, a greška mjerenja $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na slici 52 prikazan je spremnik za miješanje CO₂ i alkohola te digitalni termometar koji je korišten za mjerenje temperature.

**Slika 52. Posuda za miješanje i termometar**

Kada je hlađenje završeno nesmije proći više od 5 sekundi od vađenja epruvete iz posude do udara bata. Za vađenje uzorka i njegovo pozicioniranje na osloncima korištene su hvataljke i naprava za centriranje koje moraju osigurati nepromjenjivost temperature ispitnog uzorka.

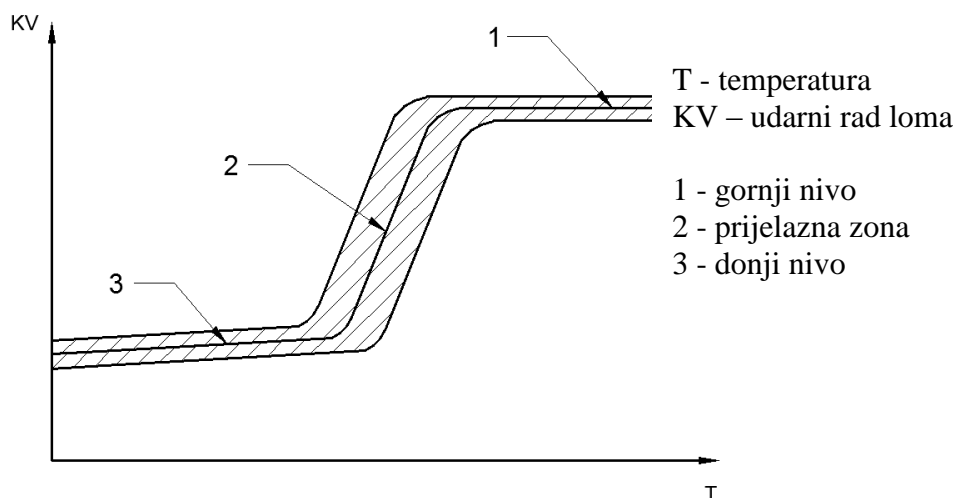
U tablici 8 navedene su vrijednosti udarnog rada loma epruveta ispitanih na temperaturama: -78, -56, -40, -23, -4, +25 °C. Na svakoj temperaturi polomljene su tri epruvete.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Oznaka epruvete	A	B	C	D	E	F	H	I	J
Udarni rad loma (J)	180	188	157	147	190	143	21	25	30,5
Temperatura(°C)	25	25	25	-4	-4	-4	-23	-23	-23
Oznaka epruvete	K	L	M	P	O	V	R	T	S
Udarni rad loma	10	15,5	12	12	5,5	7,5	4,5	6	4,5
Temperatura(°C)	-40	-40	-40	-56	-56	-56	-78	-78	-78

3.4. Analiza rezultata

Budući da je cilj ovog rada bio odrediti ponašanje materijala pri sniženim temperaturama za ispitivani čelik se pokazalo da on ima značajan gubitak žilavosti pri nižim temperaturama. Stoga se pristupilo određivanju prijelazne temperature koja predstavlja granicu između žilavog i krhkog područja. Za to je bilo potrebno konstruirati krivulju ovisnosti udarnog rada loma o temperaturi koja pokazuje apsorbiranu energiju (energiju utrošenu na lom epruvete) kao funkciju ispitne temperature. Općeniti prikaz ove krivulje dan je na slici 53. U principu krivulja se dobiva provlačenjem linije kroz pojedine vrijednosti. Izgled krivulje i raspodjela rezultata ovise o materijalu, obliku uzorka i brzini udara. U slučaju da krivulja ima prijelaznu zonu potrebno je razlikovati donji nivo, prijelaznu zonu i gornji nivo.



Slika 53. Shematski prikaz krivulje apsorbirane energije i temperature

Prijelazna temperatura \mathcal{G}_p karakterizira položaj bržeg porasta krivulje apsorbirane (utrošene) energija/temperatura. Budući da se brži porast obično ostvaruje preko šireg temperaturnog područja to u principu ne može biti prihvatljiva definicija prijelazne temperature. Stoga se za određivanje prijelazne temperature koriste slijedeći kriteriji:

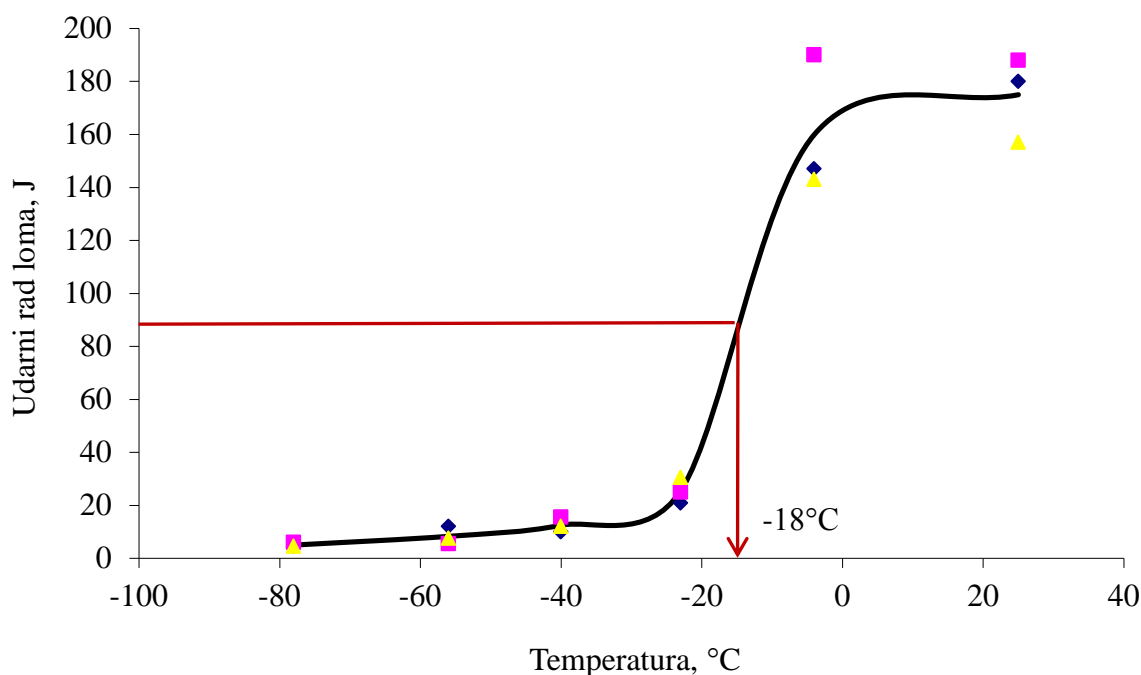
Prijelazna temperatura \mathcal{G}_p je temperatura pri kojoj:

1. se dosegne određena vrijednost apsorbirane (utrošene) energije (npr. $KV_8 = 27 \text{ J}$),
2. se dosegne određeni postotak apsorbirane (utrošene) energije gornjeg nivoa krivulje (npr. 50 %),
3. se javi određeni udio smičnog prijeloma (npr. 50 %) i
4. se dosegne određena vrijednost bočnog širenja (npr. 0,9 mm).

U ovome radu prijelazna temperatura je određena temeljem kriterija navedenih pod brojem 2 i 3.

3.4.1. Prijelazna temperatura kao funkcija utrošene energije gornjeg nivoa krivulje

Kako bi se dobila prijelazna temperatura određena postotkom utrošene energije gornjeg nivoa krivulje (50%) potrebno je nacrtati dijagram ovisnosti udarnog rada loma o temperaturi, slika 54. Kako je vidljivo iz dijagrama srednja vrijednost udarnog rada loma na sobnoj temperaturi iznosi 175 J, a 50% od te vrijednosti je 87,5 J. Povlačenjem horizontalne linije kod te vrijednosti i nalaženjem presjecišta s KV- \mathcal{G} krivuljom dobiva se prijelazna temperatura koja u ovom slučaju iznosi -18 °C.



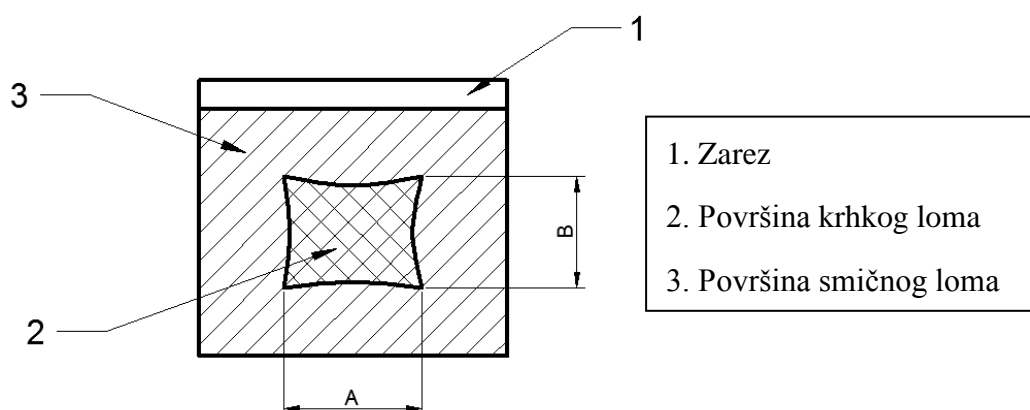
Slika 54. Dijagram ovisnosti udarnog rada loma o temperaturi

3.4.2. Prijelazna temperatura kao funkcija određenog udjela smičnog loma

Prijelomna površina Charpyevih uzoraka često sadrži određeni udio smičnog loma. Veći udio smičnog loma znači i veću žilavost materijala. Osim smičnog loma na prijelomnoj površini može biti prisutan i krhki lom. Ocjena prijelomne površine je izrazito subjektivna.

Udio smičnog prijeloma određuje se jednom od sljedećih metoda:

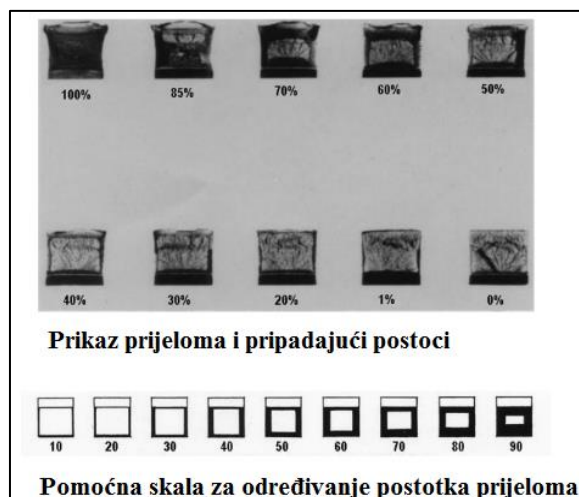
- mjerenjem duljine i širine područja krhkog loma na prijelomnoj površini, kako prikazuje slika 55 i određivanjem postotnog udjela smicanja iz tablice 9,
- uspoređivanjem prijelomne površine ispitnog uzorka s prikazima loma kao na slici 56,
- povećanjem prijelomne površine i prekrivanjem referentnim prikazom loma, ili mjerenjem postotka krhkog loma pomoću planimetra iz čega se računa postotni udio smičnog loma,
- fotografiranjem prijelomne površine uz odgovarajuće povećanje i mjerenjem postotka krhkog loma pomoću planimetra iz čega se računa postotni udio smičnog loma,
- mjerenjem postotka smičnog loma uređajem za analizu slike.



Slika 55. Određivanje udjela smičnog loma

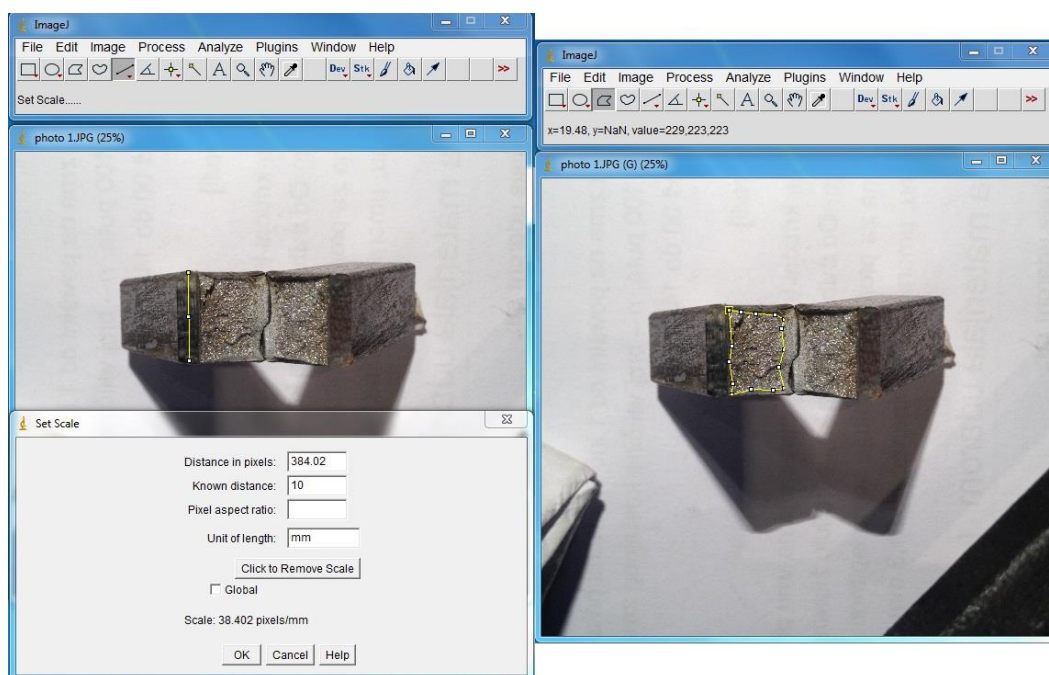
Tablica 9. Postotak smičnog loma

B mm	A mm																		
	Postotak smičnog loma																		
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
1	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	86	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0
100 % smični prijelom se javlja kada su vrijednosti A ili B jednake nuli																			



Slika 56. Izgled prijelomnih površina

U ovome radu korištena je metoda mjerenjem duljine i širine područja krhkog loma na prijelomnoj površini. Lomne površine svih epruveta su fotografirane uz odgovarajuće povećanje i pomoću programa za analizu slike „ImageJ“ (slika 57) kvantificirana je površina krhkog loma.



Slika 57. Analiza lomne površine pomoću programa „ImageJ“

Na slikama od 58, 60, 62, 64, 66, 68 prikazane su prijelomne površine svih epruveta na kojima je žutim obrubom označeno područje krhkog loma. Udio žilavog i krhkog loma za svaki set epruveta ispitanih na određenoj temperature predložen je dijagramima 59, 61, 63, 65, 67, 69.

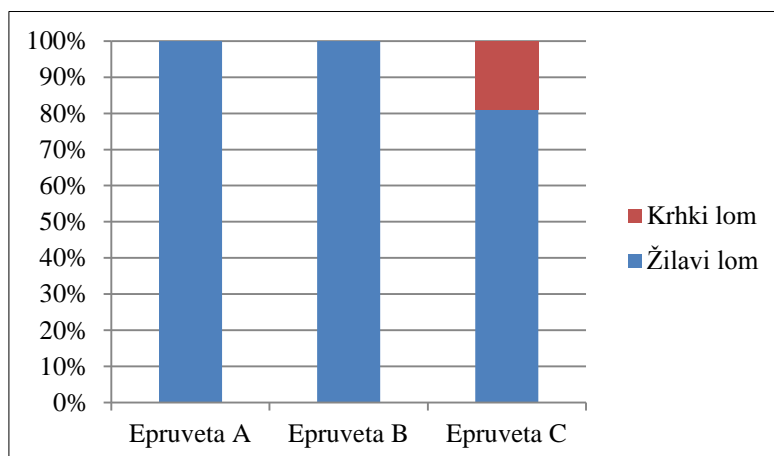
Epruveta A



Epruveta B



Epruveta C

Slika 58. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Slika 59. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

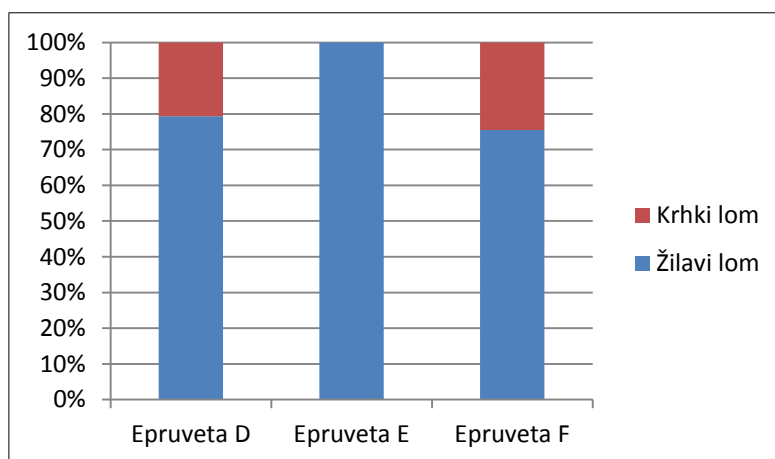
Epruveta D

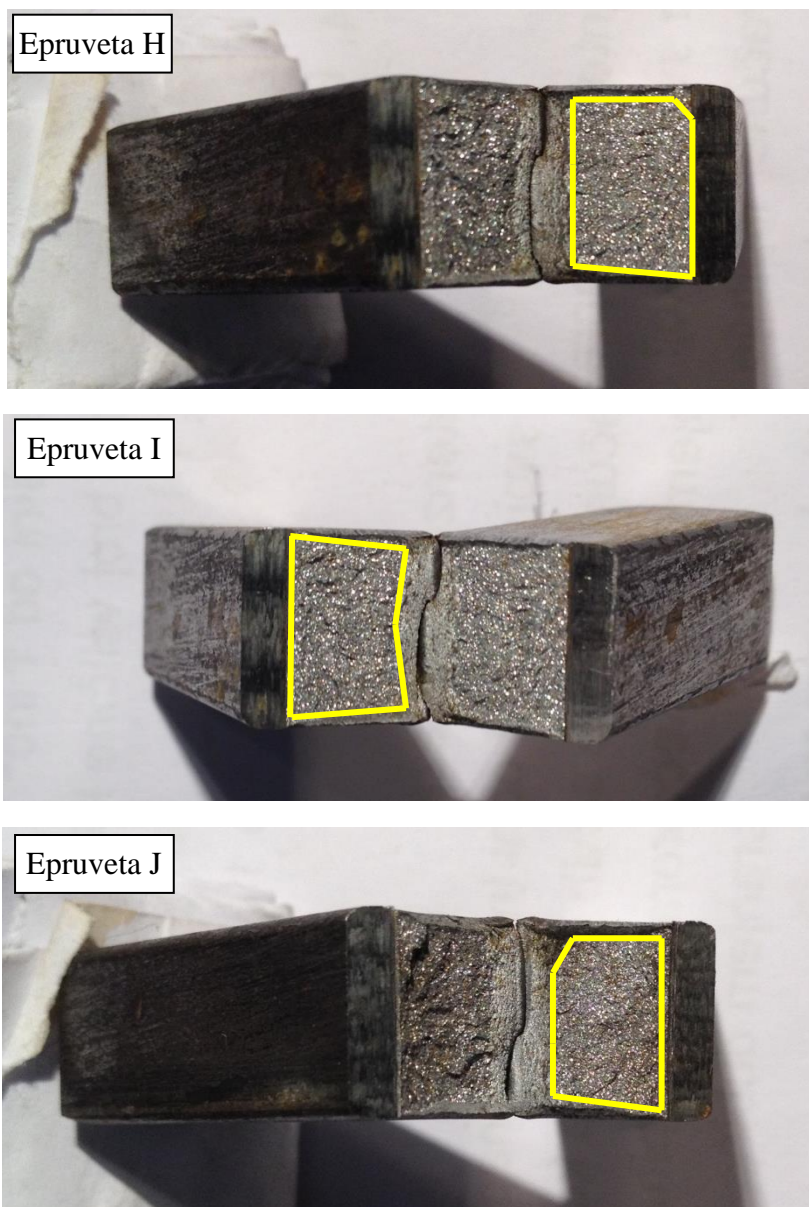
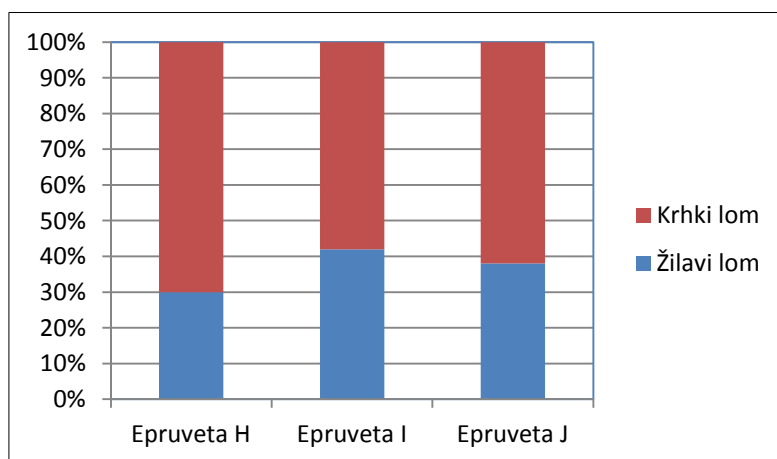


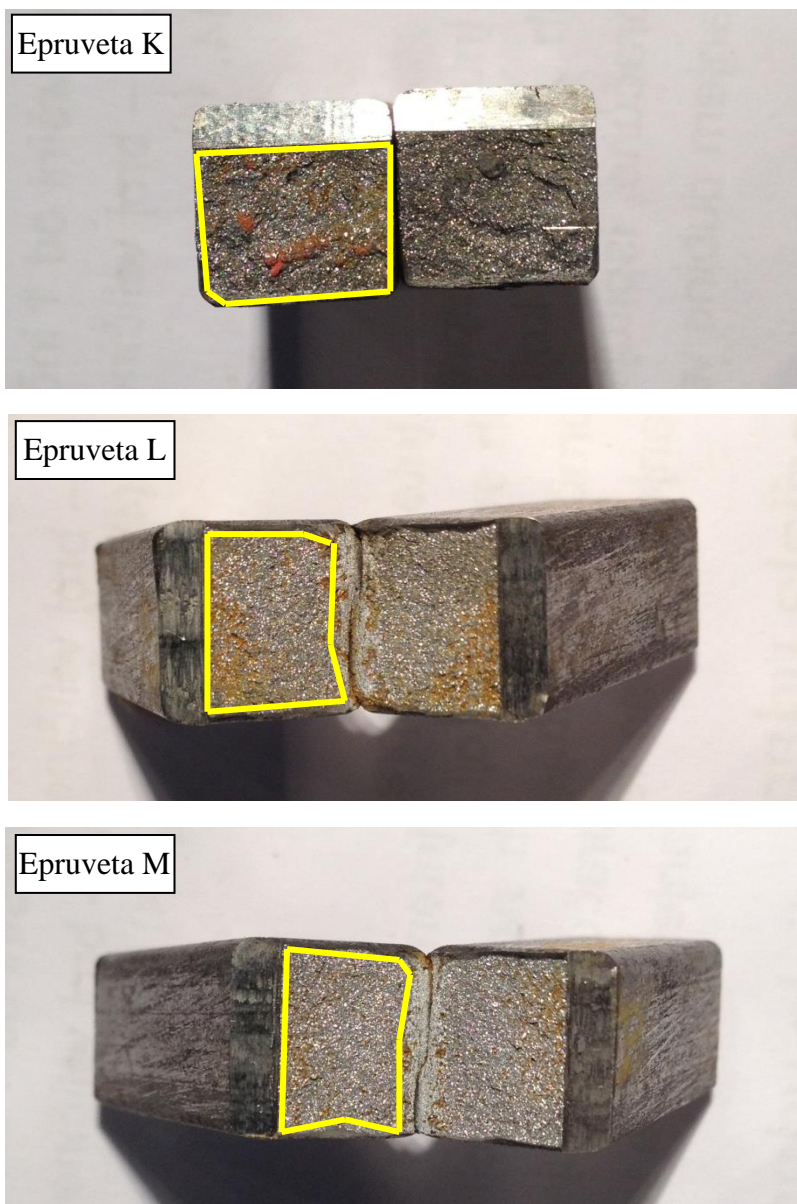
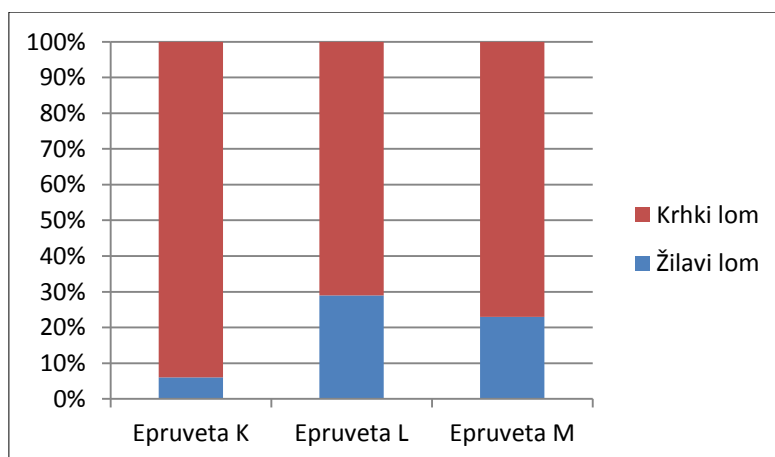
Epruveta E

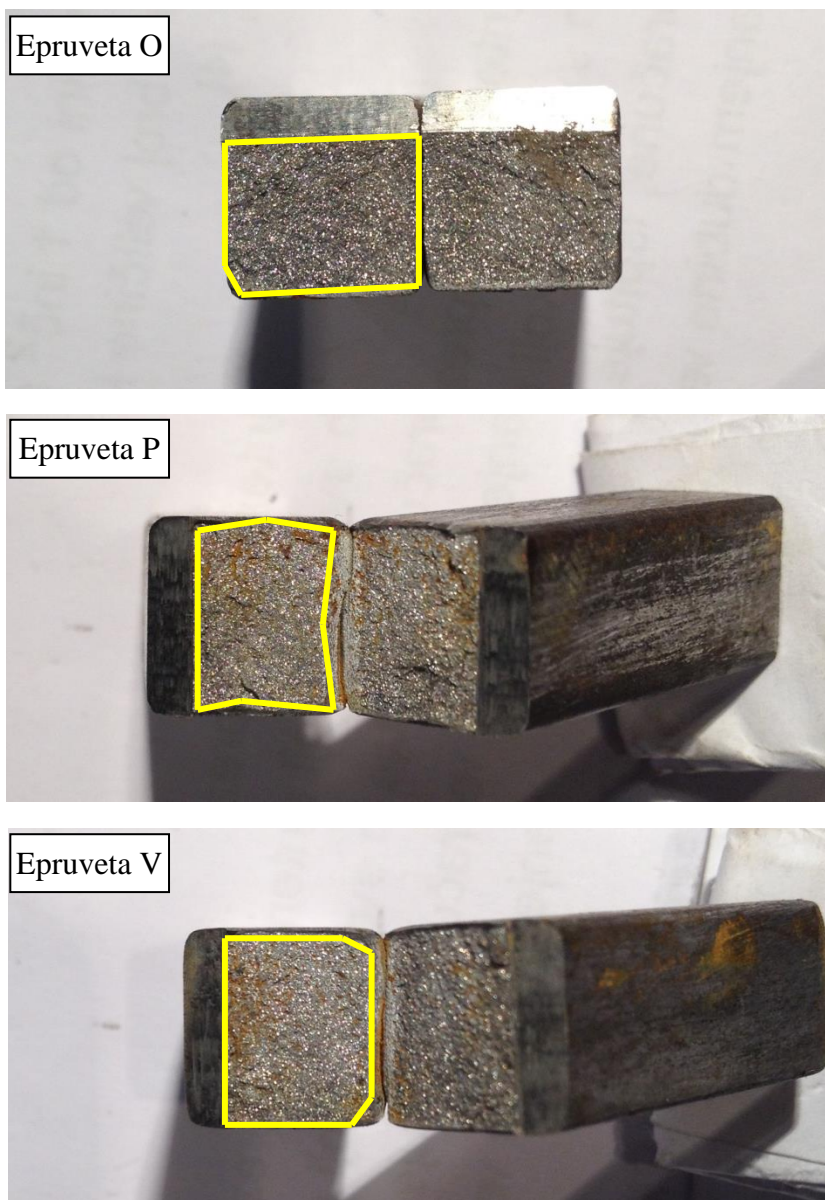
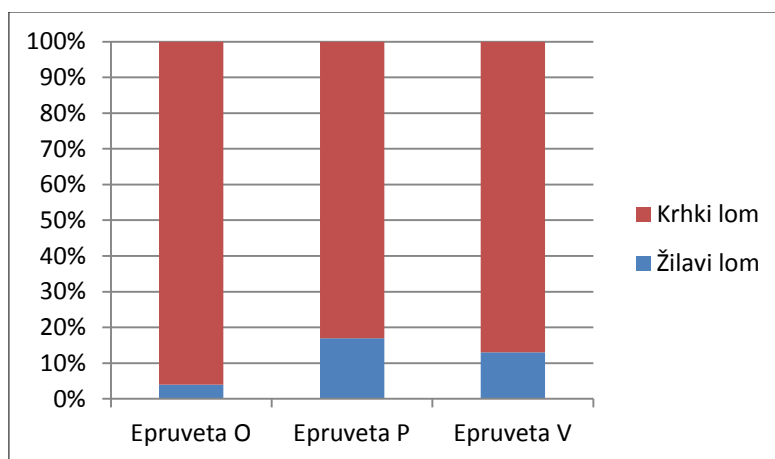


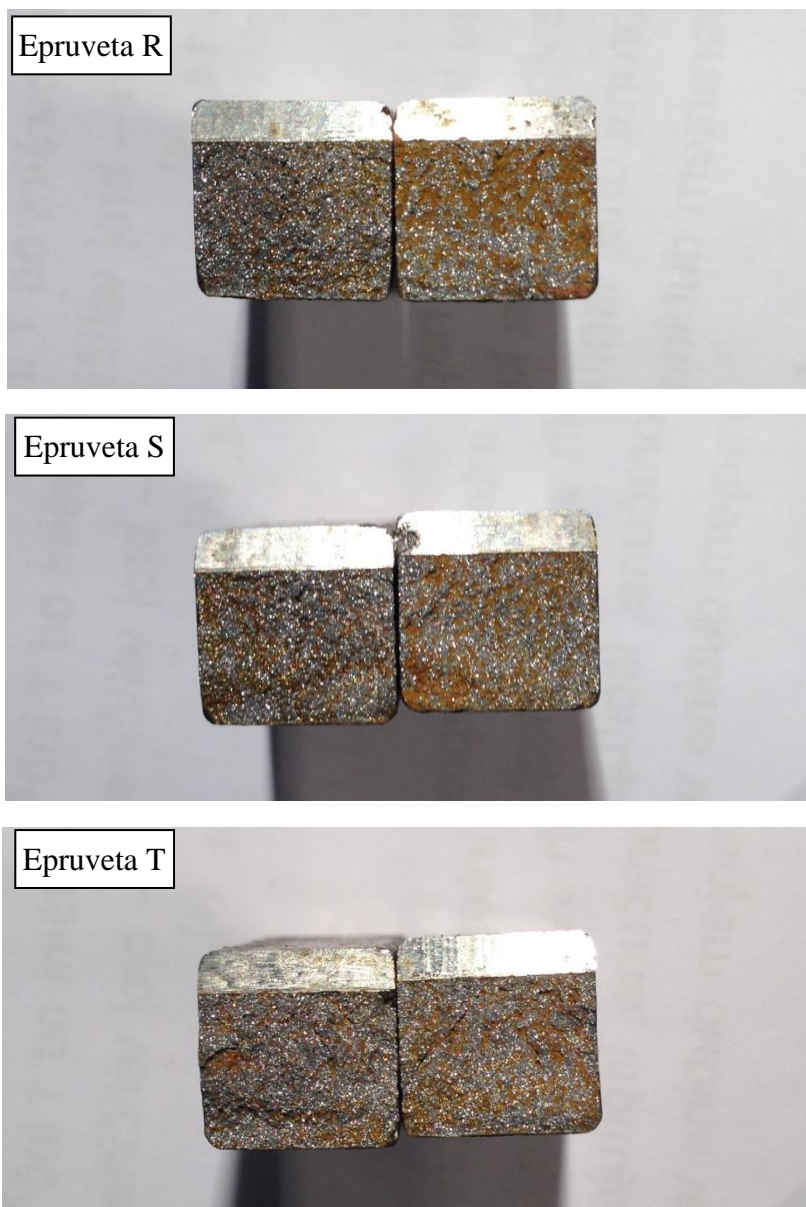
Epruveta F

Slika 60. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ Slika 61. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$

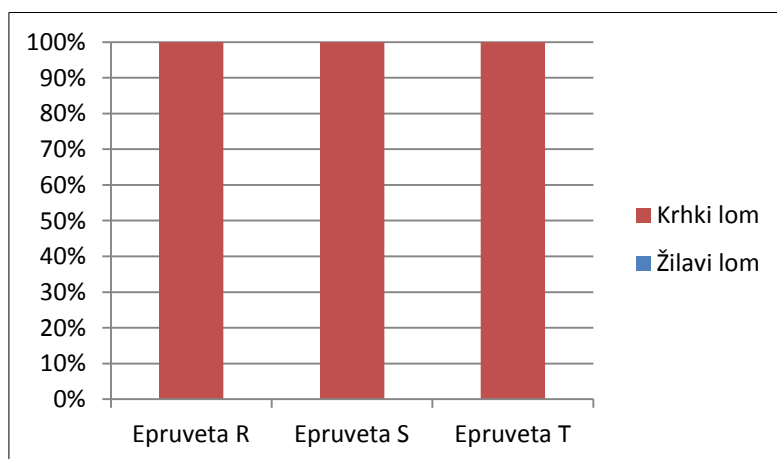
Slika 62. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$ Slika 63. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$

Slika 64. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ Slika 65. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Slika 66. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta = -56\text{ }^{\circ}\text{C}$ Slika 67. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta = -56\text{ }^{\circ}\text{C}$



Slika 68. Izgled prijelomnih površina; $\vartheta = -78\text{ }^{\circ}\text{C}$



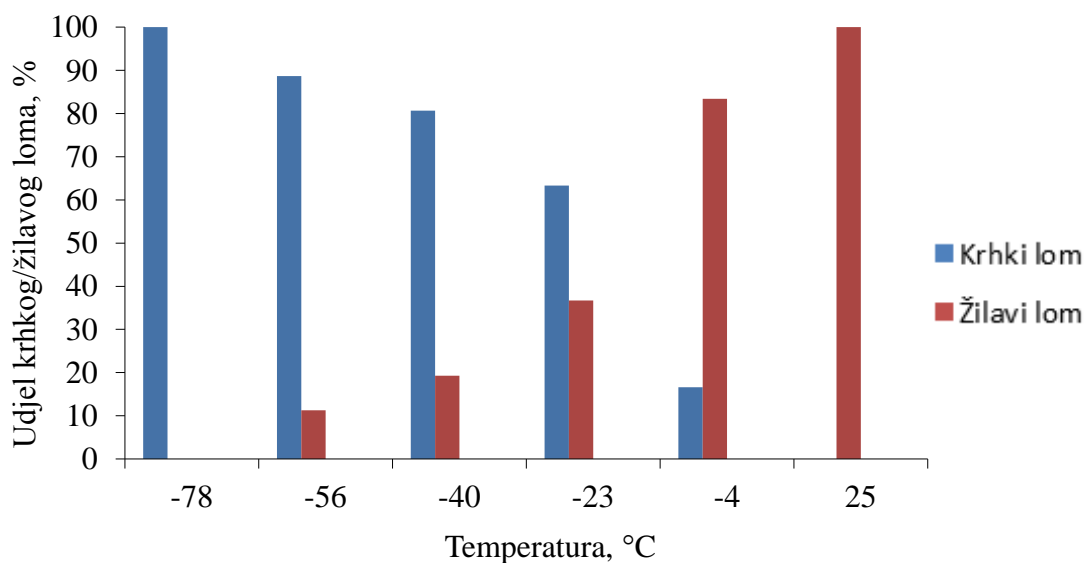
Slika 69. Udjel krhkog i žilavog loma; $\vartheta = -78\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 10 sadrži veličinu površine krhkog loma za svaku epruvetu kao i njen postotni udjel s obzirom na ukupnu prijelomnu površinu.

Tablica 10. Veličina površine krhkog loma

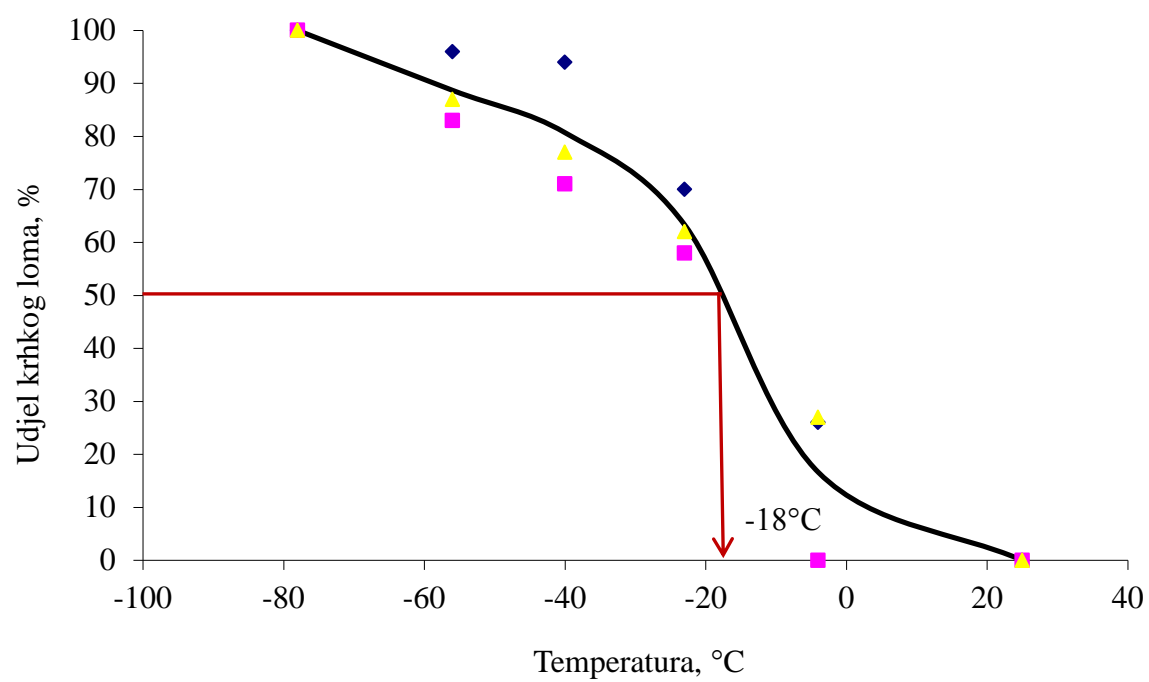
Oznaka epruvete	A	B	C	D	E	F	H	I	J
Površina, mm ²	0	0	14,5	20,4	0	21,3	55,9	46,3	49,3
Površina, %	0	0	19	26	0	27	70	58	62
Oznaka epruvete	K	L	M	P	O	V	R	T	S
Površina, mm ²	74,4	56,3	61,3	65,7	76,4	69,4	100	100	100
Površina, %	94	71	77	83	96	87	100	100	100

Kada se uprosječe rezultati udjela žilavog i krhkog loma za svaku ispitnu temperaturu dobiva se dijagram prikazan na slici 70 koji pokazuje kako se porastom temperature smanjuje postotak krhkog loma i povećava udjel žilavog loma. Odnos žilavog i krhkog loma obrnuto je proporcionalan.



Slika 70. Odnos krhkog/žilavog loma o temperaturi

Ukoliko se vrijednosti postotnog udjela krhkog loma za svaku epruvetu i svaku ispitnu temperaturu grafički prikažu regresijskom analizom rezultata dobiva se krivulja prikazana na slici 71. Iz ove krivulje također se može odrediti prijelazna temperatura kao ona temperatura kod koje udjel krhkog loma na prijelomnoj površini iznosi 50%. Uvažavajući ovaj kriterij proizlazi vrijednost prijelazne temperature od -18°C što je identična vrijednost kao na slici 54 gdje je prijelazna temperatura određena kao funkcija udarnog rada loma o temperaturi.



Slika 71. Ovisnost udjela krhkog loma o temperaturi

ZAKLJUČAK

Na osnovu provedene analize rezultata udarnog rada loma u području temperatura $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ moguće je donijeti slijedeće zaključke:

- Vrijednost udarnog rada loma ovisi o brojnim čimbenicima kao što su temperatura, stanje ispitne opreme, oblik i dimenzije epruvete, orijentacija ispitnog uzorka, centriranje epruvete na osloncima, broj ispitnih epruveta, mikrostruktura materijala, kemijski sastav, udjel nečistoća, vrsta kristalne rešetke itd. Među ovim utjecajnim veličinama posebno se ističe temperatura koja ima dominantnu ulogu kod legura metala s prostorno centriranom (BCC) kristalnom rešetkom.
- Temperaturno područje u kojem materijal prelazi iz žilavog u krhko stanje je relativno usko tj. nastupa skokovita promjena žilavosti zbog čega je potrebno odrediti prijelaznu temperaturu kao granicu žilavog ponašanja materijala. To je osobito važno za konstrukcijske dijelove koji će tijekom eksploatacije biti izloženi niskim radnim temperaturama.
- Povoljnije je da prijelazna temperatura bude što niža kako bi se pri nekoj radnoj temperaturi materijal ponašao još uvijek žilavo.
- Kod ispitivanog čelika oznake C10 kvantificirana je signifikantna ovisnost udarnog rada loma o temperaturi. Snižavanjem temperature dolazi do značajnog gubitka žilavosti i ispod određene prijelazne temperature materijal se ponaša izrazito krhko.
- Analiza prijelomnih površina epruveta s gledišta postotnog udjela žilavog i krhkog loma u potpunosti se podudara s izmjerenim vrijednostima udarnog rada loma.
- Vrijednosti prijelazne temperature određene kao funkcija udarnog rada loma o temperaturi odnosno na temelju udjela krhkog loma na prijelomnoj površini posve su identične te za ispitivani čelik C10 ova temperatura iznosi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

LITERATURA

- [1] „Materijali I“ Vinko Ivušić, Mladen Franz, Đurđica Španiček, Lidija Ćurković , Udžbenici sveučilišta u Zagrebu 2011
- [2] "Materijali u zrakoplovstvu" D. Ćorić, T. Filetin, Sveučilišni udžbenik: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012
- [3] „Izbor materijala pri razvoju proizvoda“ Tomislav Filetin , Udžbenici sveučilišta u Zagrebu 2000
- [4] “Ispitivanje materijala”, doc. dr. sc. Stoja Rešković, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, [www.scribd.com/doc, 2010](http://www.scribd.com/doc/2010.Decker). Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [5] "Tehnička enciklopedija", glavni urednik Hrvoje Požar, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [6] "Fizikalna metalurgija I", dr.sc. Tanja Matković, dr.sc. Prosper Matković, www.simet.unizg.hr, 2011.
- [7] "Materijali I", Izv. prof. dr. sc. Loreta Pomenić, www.riteh.uniri.hr, 2011.
- [8] "Svojstva i karakteristike materijala", Tomislav Filetin, Mladen Franz, Đurđica Španiček, Vinko Ivušić
- [9] <http://www.blmasinac.com/files/Vezba%206%20-%20Ispitivanje%20zilavosti.pdf>
- [10] <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/structural-integrity-faqs/faq-what-is-the-drop-weight-test-or-pellini-test/>
- [11] <http://www.wmtr.com/Content/DropWeightTesting.htm>
- [12] <http://www.azom.com/materials-equipment.aspx?cat=46>
- [13] [http://www.cyut.edu.tw/~ijase/2011/9\(1\)/2_018016.pdf](http://www.cyut.edu.tw/~ijase/2011/9(1)/2_018016.pdf)
- [14] http://hr.wikipedia.org/wiki/Vla%C4%8Dno_ispitivanje
- [15] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf>
- [16] http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html
- [17] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a>
- [18] http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_preddiplomski/4STRUKTURA_KRISTALA_21-10-2009.pdf

PRILOZI

I. CD-R dis